



***PROYECTO FINAL DE CARRERA***

***INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL***

***Especialidad Electrónica Industrial***

---

# Caracterización de dispositivos de atomización ultrasónica

---

*José Luis Navarro Arqué*

*Dirigido por: Juan Antonio García Rodríguez (C.P.S.)*

*Ponente: Esteban Calvo Bernad (E.U.I.T.I.Z.)*

*Escuela de Ingeniería Técnica Industrial, Universidad de Zaragoza*

*Marzo, 2009*

Ante todo agradecer a todo el personal del Laboratorio de Investigación de las Técnicas de combustión (L.I.T.E.C.), en especial a A. Lozano y V.Roda, toda la colaboración, soporte, apoyo y disposición prestados. Sin los cuales este proyecto no podría haber sido llevado a cabo.

También quiero agradecer a los responsables del proyecto, el director J.A. García y el ponente E. Calvo toda la ayuda prestada.

# Contenido

---

1. Introducción .....	7
2. Descripción Del Montaje y el Instrumental .....	15
2.1. Transductor ultrasónico.....	15
2.1.1. Circuito oscilador.....	16
2.1.2. Disco piezoeléctrico.....	17
2.2. Tanque de vaporización .....	19
2.3. Tanque de vaporización para seis dispositivos simultáneos. ....	20
2.4. Fuente de alimentación. ....	22
2.5. Balanza de precisión. ....	22
2.6. Cronómetro.....	22
2.7. Termopar .....	23
2.8. Polímetro .....	23
2.9. Osciloscopio .....	23
3. Análisis detallado del circuito oscilador .....	25
3.1. Metodología de análisis .....	26
3.2. Descripción de los diferentes módulos del circuito oscilador .....	26
3.2.1. Alimentación del circuito oscilador .....	27
3.2.2. Interruptor de seguridad y protecciones del circuito. ....	28
3.2.3. Polarización del oscilador en el punto medio de operación. ....	29
3.2.4. Oscilador .....	30
3.2.4.1. Fundamentos teóricos .....	30
3.2.4.2. Función de los componentes discretos del oscilador. ....	34
3.2.5. Análisis eléctrico del disco Piezoeléctrico .....	36
4. Descripción de los Experimentos .....	39

4.1.	Medida de caudal atomizado con un dispositivo .....	39
4.1.1.	Medida de caudal por variación del nivel de fluido .....	39
4.1.1.1.	Medidas con agua a distinta temperatura .....	41
4.1.2.	Medida del caudal atomizado con balanza de precisión .....	41
4.1.2.1.	Experimentos de prueba con balanza de precisión .....	43
4.1.2.2.	Medidas de prueba con mezcla acuosa de glicerina .....	43
4.1.2.3.	Medida de caudal a tensión variable. ....	44
4.1.2.4.	Medida de caudal atomizado, monitorizando la temperatura y con muestras más largas .....	45
4.2.	Caudal atomizado con múltiples dispositivos ultrasónicos. ....	47
4.3.	Fotografiado de alta velocidad .....	48
4.4.	Medida del tamaño de gotas atomizado .....	50
5.	resultados experimentales y visualizaciones .....	51
5.1.	Resultados de los experimentos de medida del caudal atomizado .....	51
5.1.1.	Resultados de “Medida de caudal por variación del nivel de fluido”. ....	51
5.1.1.1.	Medidas realizadas con distintos niveles de agua .....	51
5.1.1.2.	Agua a distinta temperatura .....	53
5.2.	Resultados para experimentos realizados con balanza de precisión .....	54
5.2.1.	Resultados de experimentos de prueba con mezcla acuosa de glicerina al 21,05% .....	56
5.2.2.	Resultados de atomización con diferentes mezclas de glicerina a tensión variable y con muestras más largas .....	58
5.3.	Resultados de experimentos con tanque para 6 atomizadores. ....	59
5.4.	Resultados las medidas de tamaño de gota atomizada .....	60
5.5.	Caudal atomizado en función de la viscosidad del fluido.....	61
6.	Conclusiones.....	65

7. Bibliografía .....	67
8. Anexos.....	71
8.1. Tablas y gráficas de medida del caudal con decremento de la altura de fluido. 72	
8.1.1. Primer experimento .....	72
8.1.2. Tablas de datos de experimentos con agua a distinta temperatura.....	74
8.2. Tablas y gráficas de los experimentos realizados midiendo el caudal atomizado con balanza de precisión .....	76
8.2.1. Tablas de datos de experimentos de prueba con balanza de precisión ..	76
8.2.2. Datos de los experimentos de prueba con mezclas acuosas de glicerina. 78	
8.2.3. Medida de caudal con tensión variable y diferentes viscosidades .....	80
8.2.4. Datos de caudal atomizado para distintas concentraciones de glicerina, monitorizando la temperatura.....	87
8.3. Tablas y gráficas de los experimentos realizados con el tanque para seis dispositivos.....	106
8.4. Curvas de caudal atomizado en función de la viscosidad .....	108
8.5. Secuencias de alta velocidad .....	119
8.5.1. Formación del cono de atomización .....	119
8.5.2. Secuencia del cono en estado estacionario .....	122
9. Índice de tablas .....	127
10. Índice de Gráficas .....	129
11. Índice de figuras .....	132



---

# 1. INTRODUCCIÓN

---

La atomización ultrasónica es una técnica que permite la atomización de fluidos mediante ultrasonidos. Para la producción de los mismos se emplea un disco piezoeléctrico que produce una deformación mecánica variable cuando se excita con una señal eléctrica variable.

Produce gotas microscópicas, en las que su diámetro es controlado en principio por la frecuencia de excitación del cristal piezoeléctrico y permite obtener tamaños de gota de menores de 5  $\mu\text{m}$  a frecuencias del orden de mega hertzios.

Esta técnica puede resultar muy conveniente en diversas aplicaciones industriales tales como: lubricación, generación de espráis, humidificadores, inyección de combustible o depuración de aguas residuales. Aunque su uso más extendido tiene lugar en el campo de la medicina, siendo un método muy adecuado en la nebulización de medicamentos para el tratamiento eficaz de enfermedades bronco-pulmonares como asma o E.P.O.C., donde el pequeño tamaño de las gotas permite la penetración de los medicamentos hasta los alveolos pulmonares.

Frente a la atomización ultrasónica, la atomización mediante métodos mecánicos tradicional presenta algunos inconvenientes en la producción de partículas microscópicas entre los que destacan: la dificultad de producir gotas de tamaño inferior a 15  $\mu\text{m}$ ; para ello se necesitan altas velocidades de fluido con pequeños orificios de salida y elevadas presiones que pueden producir obstrucciones totales o parciales en los inyectores; por último otro inconveniente es la dispersión de tamaños en las gotas.

Entre las principales virtudes de la técnica cabe destacar la capacidad de controlar el tamaño de las gotas, en principio dependiente únicamente de la frecuencia de excitación; la cantidad de gotas producidas depende de la amplitud de la onda de tensión; y la generación de gotas microscópicas de baja velocidad, que se pueden proyectar mediante una corriente de aire.

- Motivación del proyecto

La motivación de este proyecto es en primer lugar caracterizar parámetros del proceso como: cantidad de fluido atomizado en función de la viscosidad del mismo, o el límite de viscosidad que es capaz de atomizar, para el uso de la atomización ultrasónica en el ámbito industrial, dado que en aplicaciones de lubricación resultaría interesante obtener gotas de aceite de diámetro reducido para facilitar su transporte por aire. En segundo lugar, el objeto de este proyecto consiste en el desarrollo de algunos prototipos y toma de fotografías de alta velocidad para ayudar como punto de partida a posteriores investigaciones.

Las pruebas y ensayos han sido realizados en instalaciones del Laboratorio de Investigación de las Técnicas de Combustión (L.I.T.E.C.) y en el laboratorio del área de mecánica de fluidos de la E.U.I.T.I.Z.

- Contenido del proyecto

El proyecto describe todas las pruebas y montajes realizados en laboratorio y muestra los resultados obtenidos así como algunas conclusiones y observaciones. A continuación se breve descripción del contenido de cada capítulo

- Primero se describe todo el instrumental y equipo utilizado, indicando sus características más relevantes y aporte al proyecto.
- Seguidamente se describen los experimentos realizados, así como los problemas que han surgido y como se han solventado.
- Después se muestran los resultados obtenidos y se comentan las conclusiones extraídas.



- Por último, en anexos se han incluido la totalidad de los datos, gráficas e imágenes obtenidos.

- Preámbulo teórico

Las ondas estacionarias producidas en la superficie de un fluido debido a un movimiento oscilatorio en dirección perpendicular a la superficie libre empezaron a ser estudiadas por Faraday en 1831. En 1871, Kelvin obtuvo la siguiente expresión para la longitud de onda,  $\lambda$ , de dichas ondas estacionarias:

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{2\pi\sigma}{\rho f^2}}$$

Donde  $\sigma$  y  $\rho$  son, respectivamente, la tensión superficial y la densidad del fluido.

En 1883, Rayleigh modificó la anterior expresión para expresarla en función de la frecuencia de forzado,  $F$ :

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho F^2}}$$

La posibilidad de atomizar líquidos excitándolos con ondas ultrasónicas perpendiculares a la superficie libre fue descubierta por Wood y Loomis en 1927. Sin embargo el mecanismo de atomización no está claro todavía. Básicamente las explicaciones que se manejan son las siguientes:

- Cavitación bajo la superficie libre, propuesta por Söllner en 1936.
- Inestabilidad de la superficie libre, propuesta por Bisa et al., 1954; Benjamin and Ursell, 1954; Sorokin, 1957 y Eisenmenger, 1959.

En 1962, Lang obtuvo, ajustando sus datos experimentales, la siguiente expresión para el diámetro de las gotas atomizadas:

$$D = 0.34 \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho F^2}}$$

En el presente trabajo se estudia la variación del volumen atomizado con la tensión de alimentación. Se conocía la dificultad de atomizar líquidos muy viscosos y por ello se considera interesante evaluar las viscosidades que se pueden atomizar y como se ha dicho la variación del volumen atomizado con el caudal.

La variación de la viscosidad se consigue utilizando diversas mezclas de glicerina y agua, por lo que, desafortunadamente, también varía la tensión superficial. Pero dado que el efecto de la tensión superficial ya ha sido estudiado por los autores comentados en el tamaño de gota y que el estudio de esta variable junto con la viscosidad supondría realizar un inabordable trabajo experimental (con la introducción de tensoactivos en la mezcla y la necesaria caracterización de estas) para el marco de este proyecto se ha considerado suficiente la caracterización para las mezclas de glicerina y agua comentada.

Como se ha visto en el planteamiento dimensional del problema, la complejidad de una descripción desborda los límites de un Proyecto Fin de Carrera y ya es suficientemente novedoso (no hay estudios al respecto) evaluar el papel de la viscosidad.

En el presente trabajo tampoco se obtienen evidencias sobre la aparición de cavitación. Sin embargo, el deterioro de la mezcla con un 80% de glicerina que se observo en el transcurso de las experiencias junto con una estimación del incremento de presiones (en base a los desplazamiento del piezoeléctrico aportado por Hippolyte Amaveda en su tesis doctoral) en el seno del fluido permite suponer que bajo algunas condiciones se puede obtener cavitación.

- Análisis dimensional

En una primera aproximación teórica al problema se plantea el análisis dimensional del mismo.

Supondremos un recipiente de base muy grande y abierto a la atmósfera, de forma que podemos eliminar del tratamiento las magnitudes geométricas relacionadas con la sección de la base del recipiente y, también, la presión en la superficie del líquido

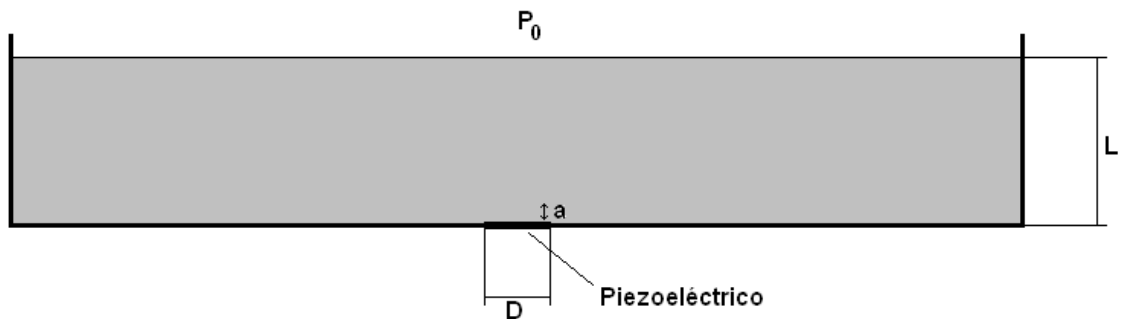


Figura 1: figura conceptual del análisis dimensional del fenómeno

Las variables de interés quedan:

- Densidad,  $\rho$ .
- Nivel de agua,  $L$ .
- Frecuencia,  $f$ .
- Desplazamiento de la superficie del piezoelectrico,  $a$ .
- Viscosidad dinámica,  $\mu$ .
- Tensión superficial,  $\sigma$ .
- Módulo de compresibilidad,  $K$ .
- Conductividad térmica,  $\eta$ .
- Diámetro del piezoelectrico,  $D$ .
- Temperatura de referencia (en un punto alejado del piezoelectrico),  $T_0$ .
- Coeficiente de expansión térmica,  $\alpha$ .

En función de las variables anteriores, podríamos caracterizar:

- 1) La altura del cono que se forma para voltajes inferiores a los que atomizan el líquido.
- 2) El diámetro de las gotas en condiciones de atomización.
- 3) Otros, como la aparición del fenómeno de cavitación.

Así, por ejemplo para la altura del cono,  $h$ , buscaríamos una relación:

$$h = f(P_0, T_0, f, a, D, L, \rho, \mu, \sigma, Z, C)$$

Una elección razonable de variables básicas para adimensionalizar es:  $a, f, \mu, T_0$ .

	L	T	M	Temp
<b>a</b>	1	0	0	0
<b>f</b>	0	-1	0	0
<b><math>\rho</math></b>	-3	0	1	0
<b><math>T_0</math></b>	0	0	0	1
<b>D</b>	1	0	0	0
<b>L</b>	1	0	0	0
<b><math>P_0</math></b>	-1	-2	1	0
<b><math>\mu</math></b>	-1	-1	1	0
<b><math>\sigma</math></b>	0	-2	1	0
<b>K</b>	-1	-2	1	0
<b><math>\eta</math>(revisar)</b>	1	-3	1	-1
<b><math>\alpha</math></b>	0	0	0	-1
<b><math>h</math></b>	1	0	0	0

Tabla 1: variables básicas para adimensionalizar el fenómeno

Obtenemos los siguientes parámetros adimensionales:

$$\frac{D}{a}, \frac{L}{a}, \frac{\mu}{a^2 f \rho} \text{ (Equivalente al inverso del número de Reynolds), } \frac{\sigma}{a^3 f^2 \rho} \text{ (equivalente al número de Weber), } \frac{K}{a^2 f^2 \rho}, \frac{\eta T_0}{a^4 f^3 \rho}, \propto T_0$$

En las experiencias realizadas se observa un apreciable incremento de la temperatura en la zona del cono, por tanto los efectos técnicos pueden ser importantes. Las otras variables relevantes del problema son la viscosidad y la tensión superficial.

El análisis realizado muestra la complejidad del problema tratado. La viscosidad, la tensión superficial, el coeficiente de expansión térmica ... dependen de la temperatura y las experiencias muestran notables variaciones de temperatura en el proceso. Por tanto para poder establecer una comparación dimensional entre el comportamiento con dos líquidos diferentes se deberían tener dependencias de las propiedades de estos con la temperatura que fueran coherentes desde el punto de vista dimensional.

El trabajo desarrollado en este proyecto pretende caracterizar el comportamiento de la atomización ultrasónica frente a la variación de la viscosidad. El estudio de la influencias de otras variables es inabordable en un Proyecto Fin de Carrera.



---

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE Y EL INSTRUMENTAL

---

En este capítulo se procederá a describir los diferentes elementos necesarios para el desarrollo del proyecto así como una breve descripción de los principios que rigen su funcionamiento y sus características más relevantes.

### 2.1. Transductor ultrasónico.

Este elemento es uno de los más importantes en el proyecto. Su función es transformar la señal eléctrica de excitación en una deformación mecánica. Está compuesto por un circuito oscilador y un disco cerámico con propiedades piezoeléctricas, ambos se describirán detalladamente en los siguientes apartados.

Este circuito aunque en apariencia es sencillo, presenta un funcionamiento complejo. El principal problema de este tipo de circuitos reside en conseguir oscilaciones de gran amplitud y alta frecuencia sin un aumento considerable del contenido armónico de la onda.

El principal problema del transductor utilizado reside en la potencia disipada, relativamente elevada (unos 60 vatios a tensión nominal), que produce un incremento de temperatura que puede destruir los componentes o hacerles perder parte o la totalidad de sus propiedades.

### 2.1.1. Circuito oscilador.

Un oscilador electrónico es una etapa electrónica alimentada con tensión continua que adquiere un comportamiento inestable, produciendo una señal de salida periódica. Produce la señal eléctrica que alimenta al piezoeléctrico

El oscilador objeto de estudio se trata de un circuito usado principalmente en la nebulización de medicaciones acuosas del fabricante *American Piezo Ceramics inc.* (Mackeyville, Pa, USA) y modelo 50-1011.

Según **datos del fabricante** los datos más relevantes del oscilador son:

Tensión nominal eficaz	48V
Potencia nominal	29W
Caudal aproximado (a tensión nominal y con agua destilada)	350 cm <sup>3</sup> /h
Frecuencia de trabajo	1,65 MHz $\pm$ 50KHz
Tamaño medio de gotas ( a tensión nominal)	2 $\mu$ m

Tabla 2: Parámetros relevantes del circuito oscilador según fabricante.

La descripción en profundidad sobre el funcionamiento del dispositivo se analizará en detalle en el capítulo 4, donde se explicarán y justificarán cada uno de los módulos del circuito.



### 2.1.2. Disco piezoeléctrico.

Este elemento transforma la energía eléctrica de la onda del oscilador en una deformación mecánica de alta frecuencia que produce la vaporización ultrasónica.

El disco es de material piezoeléctrico, en concreto *circonato-titanato de plomo* (PZT), que es un material cerámico que en presencia de un campo eléctrico se deforma en distintas direcciones según su orientación

Este fenómeno se produce en algunos materiales que poseen estructura cristalina como cuarzos, sales rochelle (tourmalina), o cerámicas metálicas. Estas últimas son las más adecuadas para la vaporización ultrasónica debido a sus características cerámicas, que les confieren gran dureza y permiten soportar la vibración producida a altas frecuencias. Además, al ser cerámicas artificiales otra de sus ventajas es la posibilidad de producir una gran diversidad de geometrías y tamaños. A continuación se muestran algunas de las geometrías más usuales:



Figura 2: Cerámicas piezoeléctricas

Para que se pueda producir el efecto piezoeléctrico es necesario orientar todas las partículas en una dirección determinada, de forma que al someter el material a un campo eléctrico, la atracción o repulsión se produzca en una única dirección y permita una deformación uniforme y de mayor magnitud. Este tipo de cerámicas posee una estructura cristalina característica denominada *perovskita*. En principio completamente desordenada, pero si se calienta en condiciones especiales por encima de la temperatura de *Curie* y se le aplica un campo eléctrico de gran intensidad, la estructura cristalina se alinea en una misma dirección, apareciendo momento dipolar. Si después se enfría lentamente, muchos de los cristales conservan en gran medida la alineación y por tanto el momento dipolar. Éste es tanto más intenso cuanto mayor sea el número de cristales alineados.

$$T = -E + \frac{D}{\epsilon^T}$$

*Ecuación 1: Tensión generada en un material piezoeléctrico, en función del campo eléctrico aplicado*

Siendo:

E: campo eléctrico (V/m)

T: esfuerzo generado, paralelo al eje de polarización del campo eléctrico (T<0 compresión, T>0 tracción)

D: desplazamiento eléctrico, dependiente del grado de polarización eléctrica y la intensidad del campo eléctrico aplicado

$\epsilon^T$ : permitividad eléctrica del material sometido a tensión constante

Así pues un cristal correctamente polarizado es sensible a campos eléctricos, experimentando deformaciones dependen que la geometría del material y la polaridad del campo eléctrico.

La principal limitación de los materiales piezoeléctricos es que se mantengan por debajo de la *temperatura de Curie*. Temperatura a partir de la cual todos los cristales pierden la alineación y el momento dipolar desaparece, perdiendo así las propiedades piezoeléctricas.

Los discos utilizados en el proyecto son de sección circular y completamente planos. Los electrodos están colocados uno en cada cara del disco, de forma que el campo eléctrico sigue la dirección del momento dipolar y provoca esfuerzos de tracción – compresión.

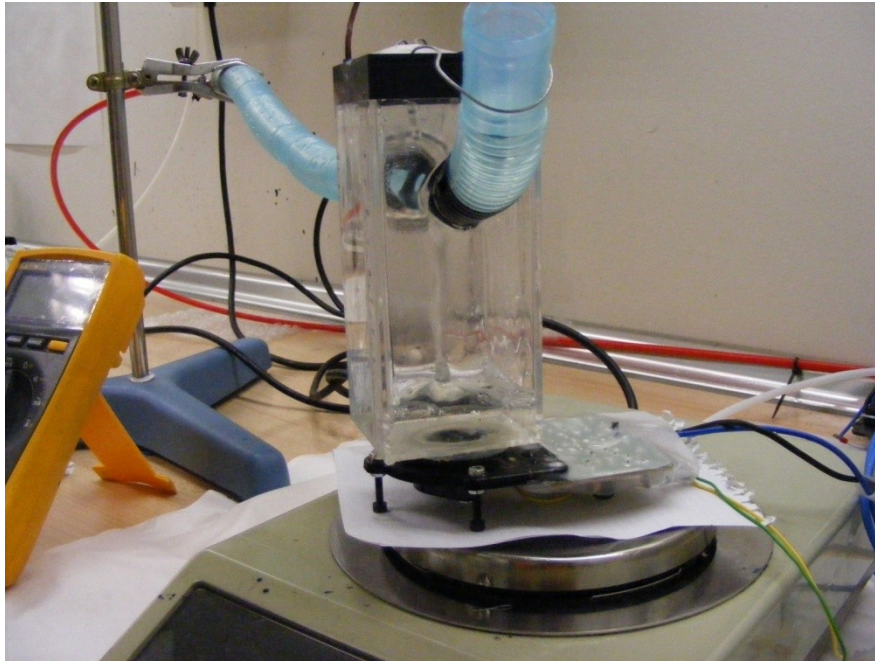
Los discos objeto del proyecto tienen las siguientes dimensiones:  $\varnothing=19.75 \text{ mm}^2$  y espesor  $=1.26 \text{ mm}^2$ .

## 2.2. Tanque de vaporización

Este recipiente tiene una doble función por un lado contiene el fluido a vaporizar y por otro disipa el calor del disco piezoeléctrico. Manteniendo de esta forma la temperatura del disco a un valor por debajo de la temperatura de Curie y asegurando el correcto funcionamiento del disco.

Es de forma prismática y está compuesto por láminas de metacrilato de  $54.4 \times 54.4 \times 124 \text{ mm}$ . Tiene un orificio inferior en el cual se ha fijado con adhesivo el transductor de ultrasonidos. En dos de las paredes hay dos orificios enfrentados, que se utilizan para introducir una corriente de aire que arrastra las gotas atomizadas y las conduce a través del otro orificio, facilitando su salida del tanque. En la parte superior del tanque hay una tapa para evitar que salpicadura de gran tamaño abandone el tanque y se falsee la medida.

El tanque está fijado con silicona adhesiva a la placa del oscilador, la cual soporta todo el montaje.



*Figura 3: Tanque de vaporización*

### **2.3. Tanque de vaporización para seis dispositivos simultáneos.**

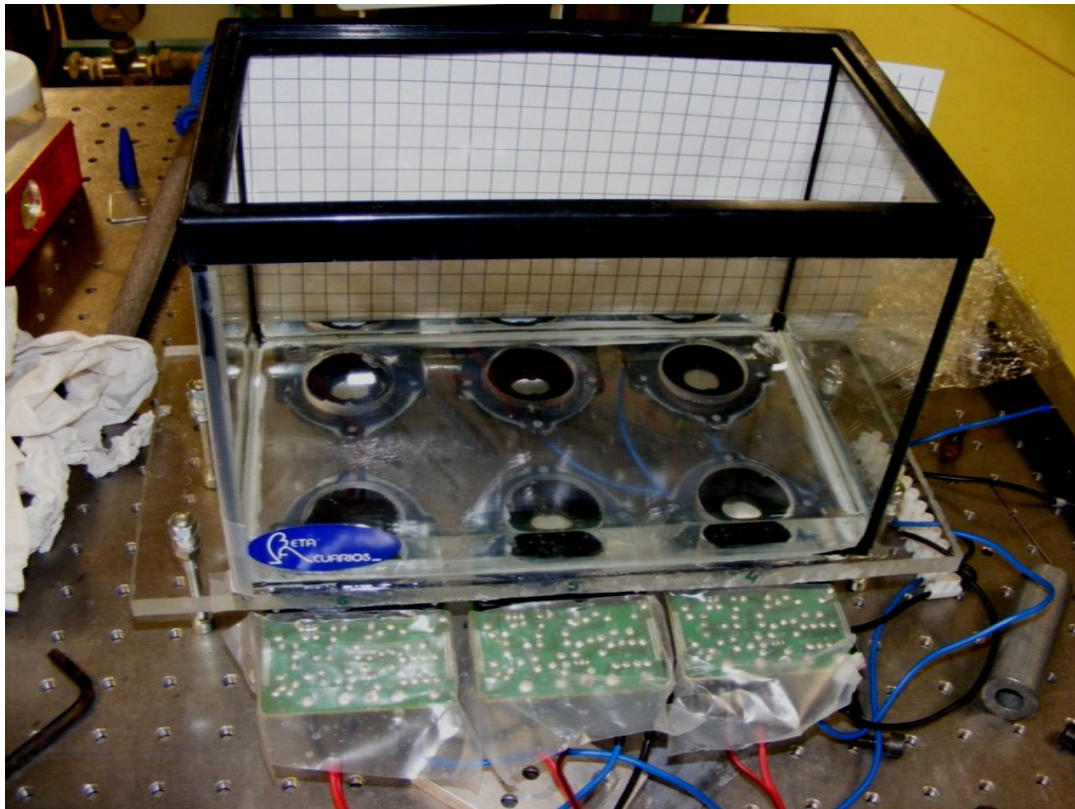
El tanque para un único dispositivo presenta algunas carencias en cuanto a la capacidad que puede albergar y sobre todo tiene limitaciones a la hora de realizar fotografías.

Por ello se construyó un tanque más grande de vidrio que posee unas propiedades ópticas más apropiadas, además al tener mayor tamaño se evita el ruido óptico producido por las salpicaduras y para experimentos de gran duración se evita que el fluido se caliente en exceso.

Aprovechando el tamaño del recipiente y como apoyo a futuras investigaciones se dispuso alojamiento para 6 placas de osciladores. Además se incluyó una tapa de

metacrilato mecanizada para servir como soporte a un impulsor y un extractor de aire para desalojar el fluido atomizado.

Este tanque tiene unas medidas de 243 x 134 x 159 mm y un espesor de 3mm, lo que le confiere una capacidad aproximada de 5180 cm<sup>3</sup>. Para acoplar las placas osciladoras se mecanizó una plancha de metacrilato de 15 mm con 6 agujeros para insertar los discos piezoeléctricos, todo ello se selló con silicona. Para poder activar uno o más discos se dispuso una regleta de conexión.



*Figura 4: Tanque de atomización para varios dispositivos*

## 2.4. Fuente de alimentación.

Proporciona la alimentación al circuito oscilador. Es una fuente de tensión continua estabilizada de marca *Instek*, modelo *GPR-6030D* y sus características nominales más relevantes son: tensión de salida nominal 62.5V, corriente de salida nominal 3A. La fuente de alimentación incluye control preciso de tensión y corriente para limitar la potencia en caso necesario. La conexión al circuito oscilador se realiza a través de dos bornes de conexión y va conectada a toma de tierra.

## 2.5. Balanza de precisión.

Se utiliza para medir el caudal de fluido atomizado. Su modelo es "*Mettler Toledo PM300*", soporta un peso máximo de 310 gramos y una resolución de 0,01 gramos. Como medida de protección frente a descargas eléctricas o salpicaduras encima del platillo metálico de medida se coloca una lámina de *PARAFILM*.

## 2.6. Cronómetro.

Se utiliza para medir el caudal másico, apuntado la masa de fluido atomizada a intervalos de temperatura fijos. Tiene una precisión de 1 centésima de segundo.

## 2.7. Termopar

Para medir la temperatura en el seno del fluido se ha utilizado un termopar tipo K. Tiene una resolución de una décima de grado y tiene una velocidad suficiente para medir la temperatura de los experimentos.

## 2.8. Polímetro

Este instrumento se ha usado en diversas tareas del proyecto, es un polímetro *FLUKE 177 True RMS Multimeter*. Se ha usado en primer lugar para medir la temperatura con el termopar tipo K, internamente compensa la temperatura ambiente y permite la utilización directa del termopar.

Por otro lado se ha utilizado para la comprobación del correcto funcionamiento de los componentes de la placa del circuito oscilador, anotación de valores de componentes y como ayuda a la hora de trazar el esquema eléctrico.

## 2.9. Osciloscopio

Para cuantificación de la onda de excitación del cristal piezoeléctrico se ha utilizado un osciloscopio *Metrix*. Este osciloscopio tiene un puerto de comunicación RS-232 que permite hacer capturas de las ondas medidas para trabajar con ellas con más comodidad.





---

## 3. ANÁLISIS DETALLADO DEL CIRCUITO

### OSCILADOR

---

Se le ha dedicado un capítulo a este parte apartado debido a la importancia de este circuito para generar la onda que alimenta al disco piezoeléctrico. La peculiaridad del circuito consiste en que el circuito oscilador tiene que ser capaz de generar una onda de alta frecuencia (para generar gotas de pequeño tamaño), de amplitud considerable, que la frecuencia del oscilador coincida con la frecuencia resonante del cristal (para que la deformación mecánica sea máxima) y por último que la onda sea lo más sinusoidal posible (la contribución armónica de la onda a la potencia transmitida es insignificante a partir de armónicos de tercer orden).

Otra cualidad importante que tienen los osciladores empleados en este tipo de aplicaciones es la frecuencia de oscilación, tiene que ser muy precisa y coincidente con la de resonancia del cristal para que la oscilación mecánica sea máxima.

Además, conocer bien el circuito oscilador es necesario optimizar la potencia consumida.

Para comprender a fondo el funcionamiento del oscilador se han analizado los dos modelos disponibles en laboratorio (uno actual y otro más antiguo, aunque en el proyecto se ha trabajado con el más moderno, es interesante conocer ambos modelos.

En las siguientes páginas se han comparado ambos modelos, destacando los defectos y virtudes de cada uno de ellos.

### 3.1. Metodología de análisis

Para analizar los dos circuitos disponibles en primer lugar se trazaron los esquemas de los circuitos correspondientes con ayuda del medidor de continuidad del polímetro.

Después se analizaron todos los componentes discretos y se obtuvieron todos sus valores relevantes. También se analizaron las formas de onda en todos los nodos con ayuda del osciloscopio

Con los esquemas electrónicos completamente trazados, se analizaron en profundidad los circuitos dividiéndolos en pequeños módulos que se explicaran en profundidad en los siguientes apartados.

### 3.2. Descripción de los diferentes módulos del circuito oscilador

Aunque los dos circuitos no son exactamente iguales, ambos presentan muchas similitudes y los dos usan el mismo tipo de oscilador.

### 3.2.1. Alimentación del circuito oscilador

Los dos circuitos están diseñados para ser alimentados con corriente alterna rectificada a través de un puente rectificador de doble onda formado por cuatro diodos. La alimentación se filtra posteriormente mediante un condensador. Aunque el puente rectificador permite el uso directamente de tensión continua.

La tensión nominal en ambos circuitos es de 48 voltios eficaces (68 voltios de tensión de pico). Por simplicidad de control durante el proyecto se han alimentado con una fuente de tensión continua regulable.

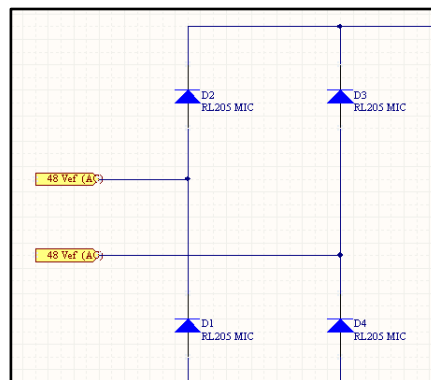


Figura 5: Puente rectificador de doble onda del circuito oscilador

### 3.2.2. Interruptor de seguridad y protecciones del circuito.

Para asegurar la integridad del disco piezoeléctrico y del transistor de potencia, ambas placas tienen un flotador que actúa como interruptor de desconexión cuando el nivel de agua es insuficiente.

En las dos placas la desconexión se produce en el lazo de polarización del punto medio de nivel de continua del transistor de potencia, impidiendo así cualquier oscilación, pero no desconecta de la red eléctrica el circuito.

Por comodidad en el proyecto el flotador se ha sustituido por un interruptor común para poder realizar un control ON/OFF muy sencillo.

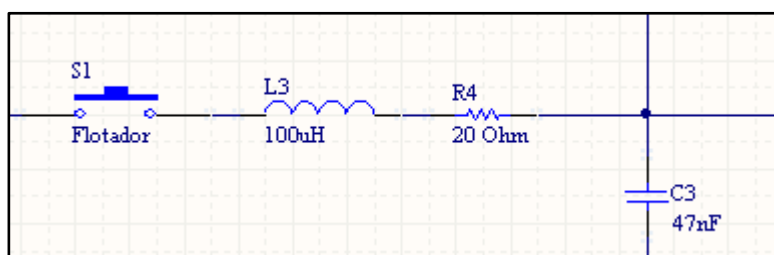


Figura 6: Interruptor de seguridad del circuito oscilador

Para proteger los circuitos en caso de cortocircuito se han usado fusibles. En el modelo viejo se ha colocado un fusible corriente de 1 amperio. En el nuevo una resistencia en serie con todo el circuito de bajo valor que actúa como fusible por efecto Joule, por su encapsulado admite una corriente máxima de 1,4 amperios.

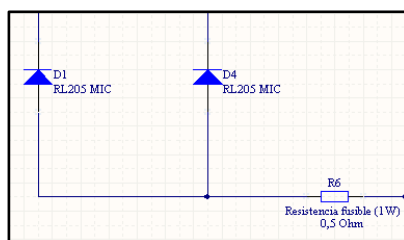


Figura 7: Resistencia fusible del circuito oscilador

### 3.2.3. Polarización del oscilador en el punto medio de operación.

Esta acción es necesaria para que la oscilación pueda generarse sin problemas de saturación o atenuación. Además se emplea este lazo para el control ON/OFF del oscilador.

Para fijar una tensión estable en el punto medio de operación, la mitad de la alimentación que se suministra al piezoeléctrico, en las dos placas se han utilizado sistemas diferentes.

En el modelo más antiguo se ha utilizado un transistor de señal en configuración de fijador de tensión. Para ello se ha conectado en base dos resistencias idénticas de  $4700\Omega$  formando así un divisor resistivo que reduce la tensión a la mitad, además se han añadido dos potenciómetros. El primero está situado en el colector del transistor, controla el nivel de continua, el segundo controla el rizado de tensión. Este fijador aunque eficaz y económico no es muy eficiente (en torno a un 63% de eficiencia).

En el modelo usado en el proyecto se sustituye el transistor por un simple divisor resistivo con potenciómetro para ajuste de la tensión y se filtra el rizado de red mediante un condensador. Siendo este sistema más eficiente que el anterior.

Para la conexión al transistor de potencia e inmunizar este nivel de tensión en ambos circuitos se ha empleado una bobina de choque para filtrar las perturbaciones de corriente producidas por el disco piezoeléctrico y un condensador de bajo valor de desacoplo para filtrar las perturbaciones de tensión producidas por el disco. De este modo se introduce un nivel de continua perfectamente plano para polarizar el transistor de potencia.

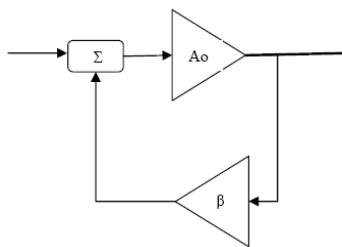
### 3.2.4. Oscilador

Este circuito es sencillo en cuanto a cantidad de componentes pero su análisis teórico es algo complejo. Por lo que su explicación se dividirá en diferentes apartados. En el primero se explicará detalladamente los fundamentos teóricos que explican su comportamiento y en el segundo se explicará la función de todos los elementos que componen cada circuito

#### 3.2.4.1. Fundamentos teóricos

Un oscilador electrónico es una etapa electrónica que alimentada con tensión continua adquiere un comportamiento inestable, produciendo una señal de salida periódica.

Para explicar este comportamiento hay que recurrir a la teoría del amplificador realimentado. Si se parte una etapa amplificadora genérica (con un factor de ganancia  $A_o$  y un factor de realimentación  $\beta$ ) y se analiza su función de transferencia:



$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{A_o}{1 + \beta \cdot A_o}$$

Figura 8: Amplificador realimentado

Ecuación 2: Función de transferencia de etapa realimentada

Siguiendo el criterio de estabilidad de *Routh - Hurwitz*, la primera condición para que una etapa sea inestable es que se establezca realimentación positiva de la salida. Después, el siguiente criterio que hay que cumplir es el de *Barkhausen*, que

dicta en primer lugar que la condición para que exista oscilación la salida de la etapa tiene que estar desfasada  $180^\circ$  respecto de la entrada ( $\arg(A_0(j\omega) \cdot \beta(j\omega)) = 180^\circ$ ); en segundo lugar, dicta que para que la oscilación sea estable, es decir que no tienda a amortiguarse ni a saturarse, el producto factor de ganancia por factor de realimentación sea igual a 1 ( $A_0(j\omega) \cdot \beta(j\omega) = 1$ ).

Un oscilador básico tiene tres impedancias: una de salida ( $Z_1$ ), una de entrada ( $Z_2$ ), una de realimentación ( $Z_3$ ). Además a las frecuencias de trabajo los circuitos de oscilación son L-C.

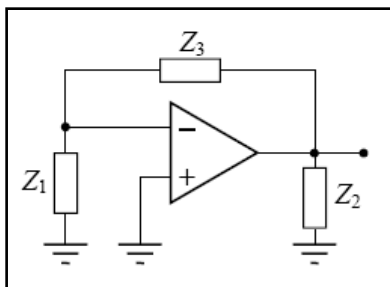


Figura 10: Esquema básico de un oscilador L-C

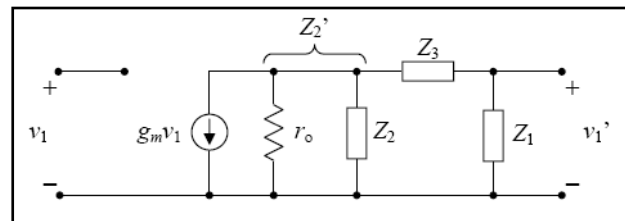


Figura 9: Circuito equivalente para señal

Partiendo del circuito equivalente de señal (Figura 9) y analizando su función de transferencia se obtiene, partiendo que todas las impedancias son puramente complejas (inductivas o capacitivas):

$$\frac{v'_1}{v_1} = \frac{-g_m r_o Z_1 Z_2}{r_o (Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_2 (Z_1 + Z_3)}; \quad Z_k = jX_k$$

$$\frac{v'_1}{v_1} = \frac{g_m r_o X_1 X_2}{j \cdot r_o (X_1 + X_2 + X_3) - X_2 (X_1 + X_3)}$$

Ecuación 3: Función de transferencia del circuito equivalente de señal

Queda un cociente con parte compleja (totalmente indeseable, pues si la señal de salida está desfasada 180º únicamente tiene que estar invertida), para eliminarla hay que hacer cumplir que:

$$X_1 + X_2 = X_3$$

*Ecuación 4: Elección del tipo de impedancias del oscilador*

Es decir, que dos de las impedancias sean capacitivas y la tercera inductiva (oscilador Colpitts) o al revés (oscilador Hartley).

Lo ideal es calcular estos parámetros para que la etapa sea críticamente estable, de modo que una pequeña perturbación inicie la oscilación (por ejemplo el ruido blanco producido por en cualquier conductor por la agitación térmica, o el pico de corriente generado por el arranque del transformador).

Para fijar la frecuencia de oscilación se suele utilizar un *circuito resonante L-C* para altas frecuencias en el lazo de realimentación. Cuando se requiere mucha precisión en la frecuencia y estabilidad de la señal se utiliza un cristal de cuarzo o un cristal piezoeléctrico.

La tipología de oscilación usada en el proyecto es la llamada *oscilador Hartley*. Se trata de un oscilador con lazo de realimentación inductivo. Aunque en lugar de utilizar una inductancia para la realimentación, se utiliza un cristal para fijar la frecuencia. En este caso se trata del propio disco piezoeléctrico que es muy conveniente debido a su elevado factor de oscilación Q y su elevada dureza que le permite soportar la vibración generada a altas frecuencias.

Como elemento amplificador se utiliza un transistor bipolar de potencia y conmutación rápida, aprovechando su factor de amplificación  $\beta$ . Para que funcione se polariza en el punto medio de la recta dinámica de carga mediante un nivel de continua y se oscila en torno a él. Para eliminar el nivel de continua de la señal de salida se utiliza un condensador de desacoplo, de forma que se obtiene una onda

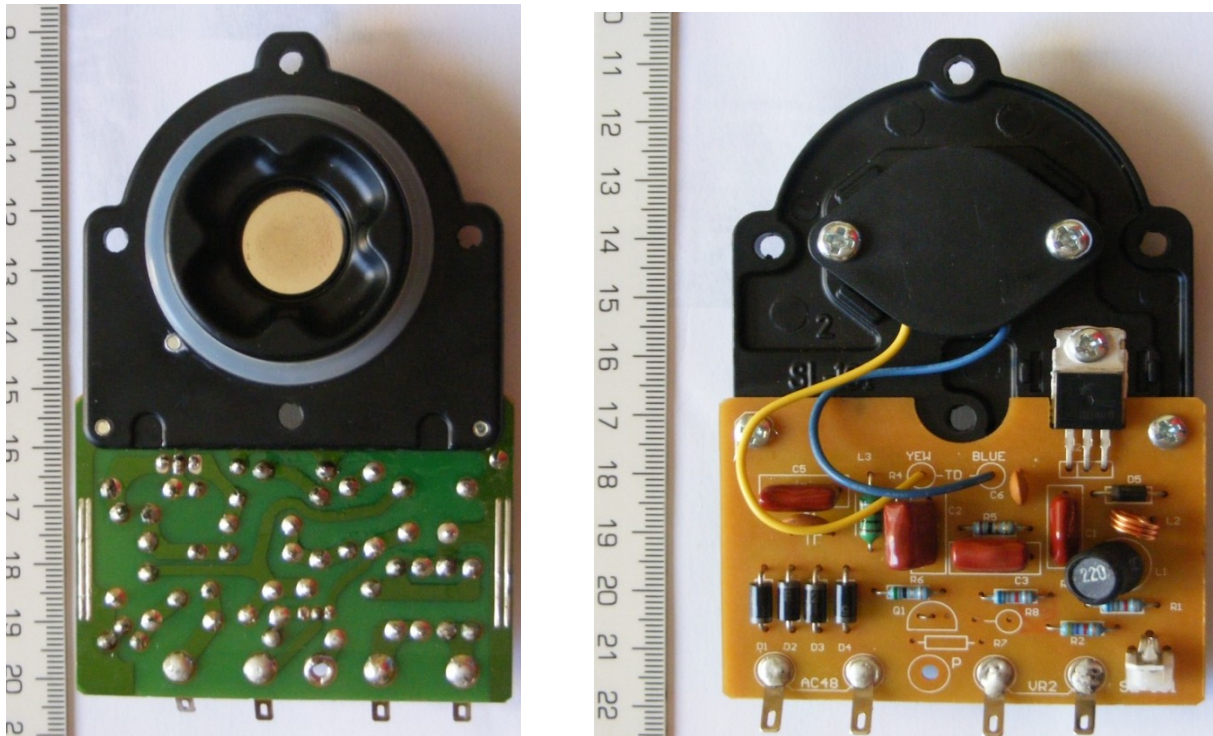


bipolar a extremos del disco piezoeléctrico. La ganancia mínima que tiene que tener el transistor para que se inicie la oscilación (partiendo de la Ecuación 3) es:

$$g_m \geq \frac{X_2}{X_1 \cdot r_0}$$

*Ecuación 5: Ganancia mínima del transistor*

La principal limitación del circuito oscilador es la potencia disipada en el transistor de potencia y en el disco piezoeléctrico. En el primero un aumento considerable de temperatura provocaría la destrucción del mismo; en el disco un aumento de temperatura excesivo provoca la desaparición paulatina de dominios de Curie, provocando así la pérdida de las propiedades piezoeléctricas. Ambos problemas se solventan gracias a que el propio fluido a vaporizar disipa gran parte del calor, manteniendo la temperatura a valores adecuados. Por otra parte el transistor de potencia está unido a la base metálica de la placa con silicona térmica, para facilitar la disipación de calor.



*Figura 11: Vista anterior y posterior del circuito oscilador*

### 3.2.4.2. Función de los componentes discretos del oscilador.

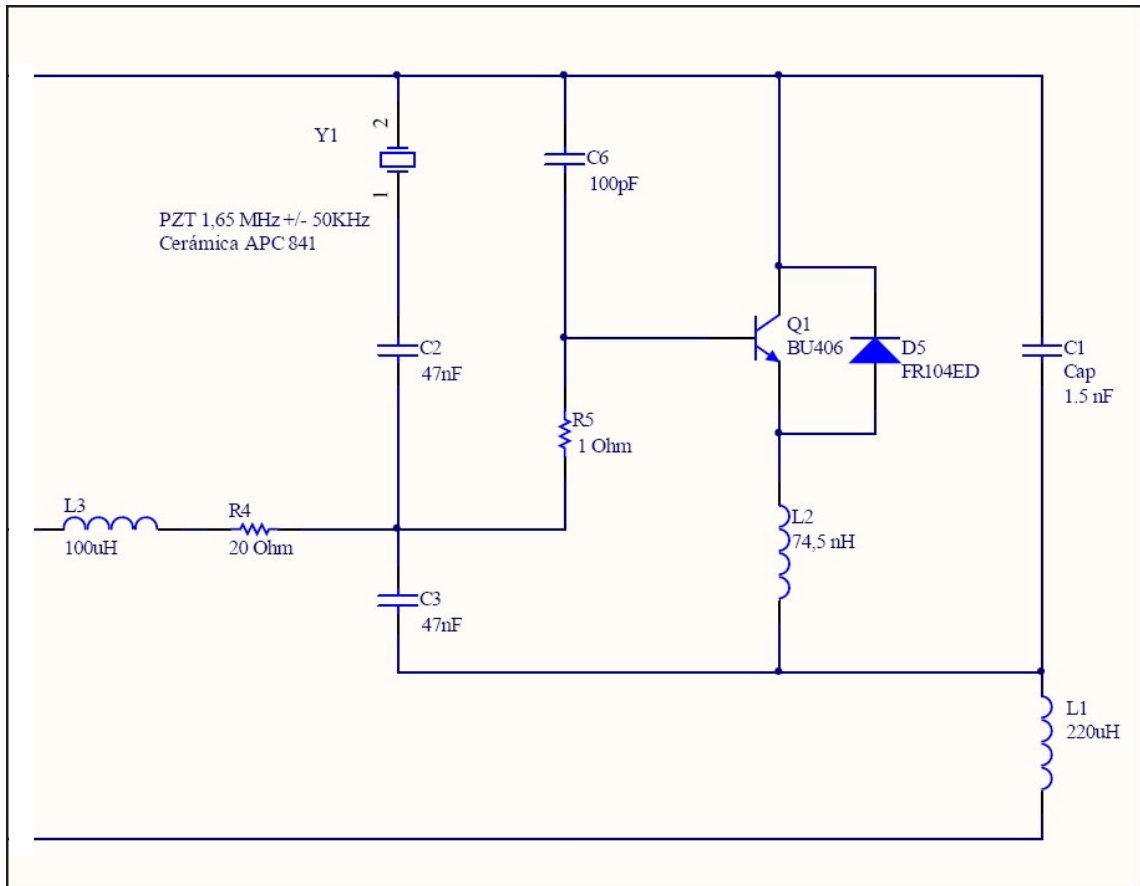


Figura 12: Detalle del circuito oscilador

Para el análisis de los componentes discretos se van a hacer los cálculos con la frecuencia teórica (1.65 MHz), aunque en la práctica no es del todo coincidente con ese valor, además los valores del circuito equivalente del piezoeléctrico son experimentales pues no se dispone de los valores teóricos. Continuando con la parte teórica, los componentes básicos del oscilador van a ser:

- Transistor (Q1): encargado de amplificar la perturbación. Es de conmutación rápida y potencia media. Además lleva entre emisor y colector un diodo schottky (D5) en anti-paralelo para evitar la entrada profunda en saturación y acelerar las conmutaciones.
- Bobinas de choque (L1 y L3): son de gran inductancia (100 y 200  $\mu$ H). Tienen una doble función por un lado filtran las oscilaciones de corriente evitando

la contaminación al resto de circuitos de ruido electromagnético. Además compensan la energía reactiva que absorbe el cristal haciendo que el *factor de potencia* se aproxime a la unidad y aumentando la eficiencia energética.

- Impedancia de entrada del oscilador ( $X_1$ ): Está formada por  $C_6$  y  $R_5$ , juntas forman un divisor de impedancias de valor:

$$X_1 = \frac{\frac{1}{C_5 j\omega}}{R_6 + \frac{1}{C_5 j\omega}} \cong 1_{-0,059^\circ}$$

- Impedancia de salida del oscilador ( $X_2$ ): debido a que  $L_1$  tiene una impedancia mucho mayor que  $L_2$ , solamente se va a considerar esta última

$$X_2 = Lj\omega \cong 0,772_{90^\circ}$$

- Impedancia de realimentación del oscilador ( $X_3$ ), se trata del piezoeléctrico: Tiene la propiedad de tener una impedancia mínima a su frecuencia de resonancia (1.65 MHz) y además a esa frecuencia el comportamiento del cristal se puede modelar prácticamente como inductivo. También tiene la propiedad de discriminar cualquier frecuencia que no sea la de resonancia, con lo que la onda de salida va a tener una calidad muy aceptable. Como la impedancia del cristal es mucho mayor que el resto se ha acoplado mediante un divisor capacitivo ( $C_2$ ,  $C_3$ ) que no aporta fase pero reduce mucho la impedancia, de forma que sea de la magnitud del resto.

$$X_3 = \frac{\frac{1}{C_3 j\omega}}{\frac{1}{C_3 j\omega} + \frac{1}{C_2 j\omega} + L_{cristal} j\omega} \cong 0,006_{89,31^\circ}$$

- Impedancias  $X_2$  y  $X_3$ : se encargan de adelantar la fase de la salida  $180^\circ$ . Son del mismo valor para aumentar el factor de calidad del oscilador, Q.
- Condensador de desacoplo ( $C_1$ ): evita que la bobina anterior cortocircuite colector y emisor. De otra forma la impedancia de salida del transistor quedaría en paralelo con la de la bobina y haría falta un transistor con una

ganancia muy superior. No afecta al resto de impedancias porque tiene una capacidad mucho mayor.

- Divisor capacitivo ( $C_2$ ,  $C_3$ ) tiene una doble función por un lado la comentada anteriormente y por otro desacoplar el nivel de continua, de modo que a efectos del circuito equivalente para señal únicamente intervengan las impedancias  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ .

### 3.2.5. Análisis eléctrico del disco Piezoeléctrico

Desde el punto de vista electrónico el disco piezoeléctrico puede modelarse como una serie de componentes discretos. Resulta obvio que si el disco presenta mucha sensibilidad a determinadas frecuencias, frecuencias de resonancia, su circuito equivalente va a tener como mínimo una rama óhmico – inductiva – capacitiva (RLC).

Todos los discos piezo-cerámicos tienen varias frecuencias de resonancia donde la impedancia equivalente del mismo desciende considerablemente (y la vibración mecánica aumenta), pero solo una de esas frecuencias resonantes es con la que se consigue la mínima impedancia (y máxima amplitud en la vibración mecánica). La frecuencia resonante de mayor importancia es la primera y es para la que se va a caracterizar el disco.

En primer lugar todos los piezoeléctricos presentan una capacidad estática ( $C_0$ ) asociada a los electrodos metálicos necesarios para polarizar el disco. Esta capacidad no tiene un efecto apreciable sobre el comportamiento del disco. En segundo lugar está la rama RLC situada en paralelo, si se tienen en cuenta todas las frecuencias de resonancia por cada una de ellas habría que añadir en paralelo otras ramas RLC, pero como a la frecuencia de trabajo tienen una impedancia muy superior se desprecian.

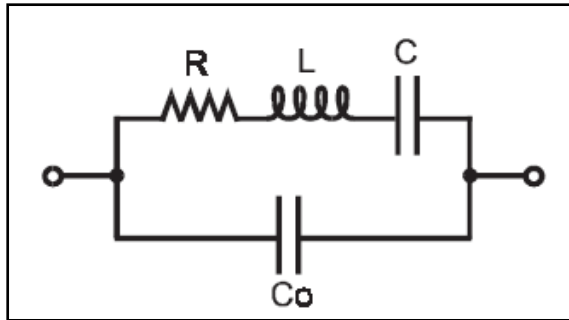


Figura 3: Circuito equivalente del disco piezoeléctrico

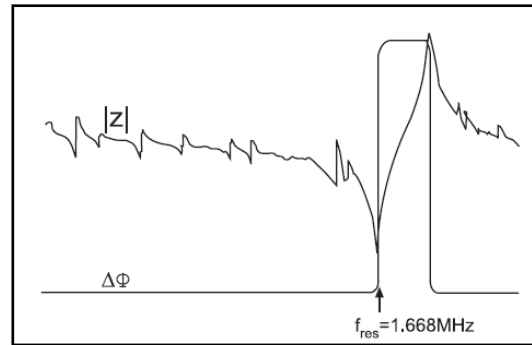


Figura 4: Impedancia del disco en función de la frecuencia

A modo orientativo se incluyen los valores del disco del modelo antiguo, extraídos del artículo: *Sistema de excitación por pulsos para la caracterización de resonadores para atomización*, mediante un analizador de espectros HP4195A.

Capacidad estática ( $C_0$ )	706,499 pF
Resistencia (R)	2,2 $\Omega$
Inductancia (L)	67,26 $\mu$ H
Capacitancia (C)	135,283 pF
Frecuencia de resonancia ( $f_r$ )	1,66 MHz

Tabla 3: Valores del circuito equivalente asociado al disco piezoeléctrico



---

## 4. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

---

En este capítulo se describen los distintos experimentos llevados a cabo y las distintas soluciones planteadas hasta llegar al montaje final.

### 4.1. Medida de caudal atomizado con un dispositivo

#### 4.1.1. Medida de caudal por variación del nivel de fluido

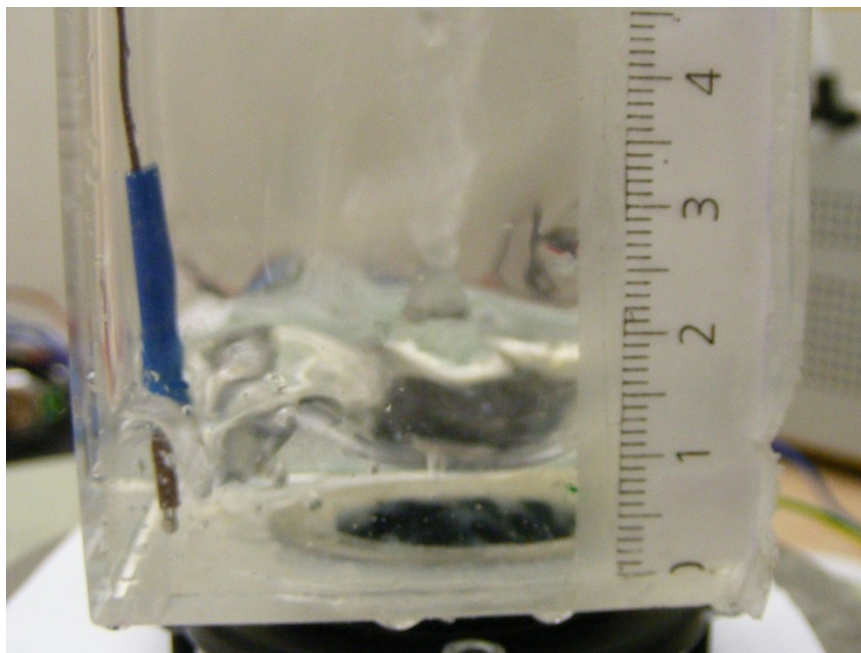
En una primera aproximación para medir el caudal de fluido atomizado se midió el descenso del nivel de fluido. Esta técnica en principio sencilla, no resultó como se esperaba, debido a que cuando se vaporiza el fluido se proyectan gotas de mayor tamaño que se depositan en la tapa y las paredes del recipiente. Estas gotas al precipitarse de nuevo, falsean la medida haciendo que el nivel en ocasiones no descienda e incluso aumente.

Durante esta fase se intentó solventar el problema de la precipitación de gotas elevando la altura del recipiente, bajando la tensión de alimentación o dejando el recipiente destapado. Todos intentos fallidos.

Tras varios intentos infructuosos se localizaron varios fallos y deficiencias en el diseño inicial entre las que cabe destacar fugas en el tanque, aunque de poca importancia en la duración de las pruebas hacían descender el nivel de agua lo suficiente para falsear la medida; también se añadieron conos de entrada y salida, el primero para evitar que la corriente de aire salga del recipiente sin arrastrar las gotas de agua; el segundo evita que las gotas de mayor tamaño abandonen el recipiente con velocidades de aire relativamente elevadas.

Otro efecto que afecta a la precisión a la hora de medir el caudal por este procedimiento es el menisco producido por la tensión superficial del fluido, que hace que obtener una medida fiable sea complejo.

Para realizar los experimentos se empleo agua destilada. Se hicieron a una tensión constante de 48 voltios, durante 10 minutos y a intervalos regulares de 60 segundos se medía el nivel de fluido. Se realizaron varias pruebas para comprobar el comportamiento del atomizador, aunque se desecharon por carecer de precisión, reflejan dispersiones en los caudales atomizados.



*Figura 13: Detalle de la regla para la medida del nivel de fluido*



#### **4.1.1.1. *Medidas con agua a distinta temperatura***

En las siguientes medidas, se intentó ver la influencia de la temperatura del disco en el caudal atomizado. Para ello se hicieron varias pruebas con el sistema completamente en frío y otras dejando parado el sistema a intervalos controlados. Todos los experimentos se realizaron partiendo del mismo nivel de altura (50 milímetros).

Se hicieron dos pruebas partiendo del equipo completamente en reposo, otra a los 3 minutos de funcionamiento y otra a los 6 minutos.

#### **4.1.2. Medida del caudal atomizado con balanza de precisión**

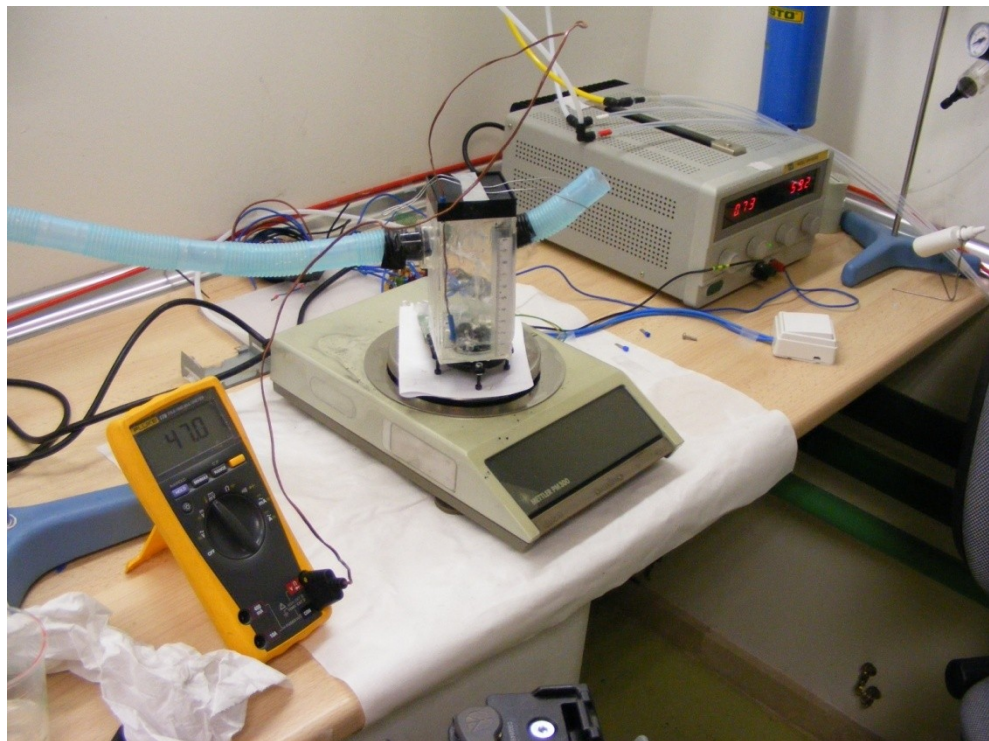
A la vista de todas las dificultades encontradas en la medida del nivel de altura de fluido, se decidió medir la masa de agua atomizada con una balanza de precisión.

La principal ventaja de este método reside en que se mide el decremento de masa en el tanque de vaporización, de forma que no importa la salpicadura de gran tamaño, ni efectos menisco, ni deposición de fluido en los conos de entrada o salida, mientras no abandone el recipiente.

El principal inconveniente de esta técnica reside en la propia balanza de precisión (es sensible a centésimas de gramo), cualquier perturbación puede alterar la medida. Así pues, las precauciones para realizar medidas correctas son numerosas y hacen que el proceso de medida sea arduo. A continuación se presentan las medidas tomadas durante el proyecto:

- La primera medida ha tomar es nivelar la balanza.
- La segunda es posicionar adecuadamente la balanza de forma que ningún cable ni tubo ejerza tensión mecánica, de forma que el peso se inestabilice.

- También hay que impedir que salpicadura de gran tamaño abandone el recipiente, puesto que una gota de gran tamaño equivale a miles de gotas microscópicas.
- Proteger la balanza frente a las salpicaduras; también eléctricamente puesto que las patas del atomizador no están conectadas a toma de tierra y se producen cortocircuitos al entrar en contacto con el platillo metálico de la balanza (conectado a toma de tierra).
- Otro factor a tener en cuenta es no usar velocidades de aire demasiado altas puesto que el peso del aire altera la medida. Además de todas las precauciones anteriores, hay que tener cuidado de no hacer movimientos bruscos cuando se está realizando la medida y asegurar que la mesa de trabajo este sometida a vibraciones mecánicas.



*Figura 14: montaje de medida con balanza de precisión y monitorización de temperatura*

#### ***4.1.2.1. Experimentos de prueba con balanza de precisión***

Para comprobar el correcto funcionamiento con este nuevo montaje se realizaron varios experimentos para comprobar su comportamiento. En el primero se vaporizaron 11 mm de agua destilada ( $32,5 \text{ cm}^3$ ) durante 10 minutos y a una tensión constante de 48 voltios.

Los resultados fueron plenamente satisfactorios, por lo que las siguientes pruebas se realizaron con una mezcla acuosa de glicerina.

#### ***4.1.2.2. Medidas de prueba con mezcla acuosa de glicerina***

Tras los resultados anteriores el siguiente paso es comprobar los resultados con mezclas acuosas de glicerina, para ver el comportamiento del dispositivo frente a fluidos de viscosidad mayor que la del agua.

Los datos tomados con la mezcla acuosa al 21,05% en volumen también fueron satisfactorios, se realizaron dos pruebas con diferentes alturas de fluido (la primera a 15 mm y la segunda a 13mm), ambas a 48 voltios, como las anteriores, durante 10 minutos y con muestreos cada 60 segundos.

#### 4.1.2.3. *Medida de caudal a tensión variable.*

Continuando con los experimentos de prueba el siguiente paso fue caracterizar el caudal atomizado a tensión de excitación variable y con distintas concentraciones de glicerina para tener distintas viscosidades.

Para ello se realizaron medidas desde 60 voltios como máximo hasta la tensión mínima de vaporización (aumenta conforme aumenta la concentración). Las muestras se tomaron cada 5 voltios y durante un minuto cada una. Para expulsar el fluido atomizado se introdujo una corriente de aire de baja velocidad por uno de los orificios del tanque. Para evitar efectos indeseados de segundo orden para todas las medidas se parte de una altura de fluido de 15 mm ( $45 \text{ cm}^3$ ).

Un gran inconveniente de este método es que no tiene en cuenta dos factores importantes como son: la variación de temperatura del fluido durante el funcionamiento (la disipación de temperatura del disco se realiza a través de él), factor que varía notablemente la viscosidad del fluido; y otro que aunque el comportamiento del disco es cuasi lineal, hay variaciones de rendimiento a lo largo de su funcionamiento. No tener en cuenta estos dos factores provoca que una misma medida en diferentes ocasiones con las mismas condiciones (tiempo, tensión y concentración de glicerina), presente valores sensiblemente diferentes.

Así pues, se optó por cambiar el sistema de medida con muestreos de tiempo más cortos. Sistema que se explicará en profundidad en el siguiente apartado.

#### *4.1.2.4. Medida de caudal atomizado, monitorizando la temperatura y con muestras más largas*

Esta última tanda de medidas es la definitiva del proyecto. Se han tratado de solventar todas las deficiencias de los montajes anteriores. Para evitar problemas de dispersión de medidas se han realizado pruebas con muestreos más cortos.

A continuación, a modo de resumen se detallan todas las características y mejoras del montaje.

- Se han reparado todas las fugas de la instalación, comprobando el estado del sello de silicona y los empalmes de los tubos.
- Para un mejor ajuste se han sustituido los conos rígidos anteriores por tubo flexible, evitando así fugas en los empalmes.
- El tubo de salida se ha doblado formando un codo que imposibilita que la salpicadura de mayor tamaño (fluido no atomizado) abandone el recipiente.
- Para evitar el arrastre de este tipo de salpicadura también se ha reducido la velocidad del aire de entrada. Con esta medida también se evita el arrastre de fluido con el equipo parado.
- El caudal atomizado se mide utilizando la balanza de precisión. Evitando los inconvenientes de medir la altura del fluido.
- Con el fin de evitar medidas erróneas se han tomado las siguientes medidas:
  - Se ha cuidado mucho el correcto nivelado de la balanza en todas las medidas.
  - Se ha comprobado exhaustivamente el correcto posicionamiento del recipiente en la balanza (evitando tensiones mecánicas de cables o tubos que alteran el peso del recipiente) antes de cualquier medida.

- Durante la medida del peso se ha evitado cualquier movimiento brusco en torno a la balanza y se desconecta la alimentación eléctrica para evitar cualquier oscilación que perjudique a la medida.
- Para tener en cuenta la influencia de la temperatura, se ha monitorizado la temperatura del fluido en cada medida.

Las pruebas realizadas se han hecho sobre distintas mezclas acuosas de glicerina. Partiendo de agua destilada hasta llegar a concentraciones del 80% en volumen, concentración a la que se alcanza el límite de viscosidad que puede atomizar el equipo. Con cada mezcla se han realizado medidas empezando a tensión constante durante 5 minutos, anotando valores cada 30 segundos y con tensiones que van desde 60 voltios hasta que el dispositivo deja de atomizar, a intervalos de 5 voltios.

Aunque la glicerina en principio no es una sustancia nociva, irrita la vía respiratoria y puede provocar lesiones. Como medida de seguridad, debido a la peligrosidad del tamaño de las gotas atomizadas, que pueden alcanzar fácilmente los alveolos pulmonares y formar depósitos de glicerina en ellos, se ha usado continuamente mascarilla (factor de protección FP2) y se ha aspirado la nube de gotas generada. Evitando la introducción de glicerina en el interior de los equipos del laboratorio debido al tamaño de las gotas generadas.

## 4.2. Caudal atomizado con múltiples dispositivos ultrasónicos.

Aunque no es el objeto principal del proyecto, aprovechando el montaje del tanque para seis dispositivos se ha medido el caudal de agua atomizada con varios dispositivos funcionando a la vez.

Como el peso de la instalación, en este caso, es notablemente superior al peso máximo de la balanza de precisión, las medidas se han realizado sobre una balanza normal que soporta un peso máximo de 60 Kg y tiene una sensibilidad de 20 gr. La sensibilidad de la balanza es un gran inconveniente pero se solventa aumentando la duración de las pruebas.

Las pruebas realizadas son de carácter orientativo. Consisten en poner en funcionamiento de uno en uno todos los dispositivos, comparando así el rendimiento al usar varios discos a la vez.

Para desalojar todo el fluido atomizado se ha empleado un ventilador impulsor de aire, mecanizado en una tapa de metacrilato con orificios de salida.



*Figura 15: Tanque para 6 atomizadores funcionando*



### 4.3. Fotografiado de alta velocidad

Para internar visualizar algunos fenómenos que tienen lugar en el seno del cono que se produce durante la atomización ultrasónica, se han tomado diversas secuencias con una cámara de alta velocidad.

Las fotografías se han realizado con una cámara de alta velocidad *RedLake* con software de *MotionPro* y un objetivo *Sigma 2.8/70-200 mm APO Nikon*. Para conseguir el aumento necesario se le acoplo un fuelle para aumentar la distancia entre el plano principal imagen del objetivo y el plano imagen. La disminución de ángulo sólido asociada al aumento de la comentada distancia se compensa abriendo al máximo el diafragma (se usa  $f/22$ ).



Figura 16: Montaje del objetivo fotográfico en la cámara de alta velocidad.



Todo el conjunto se apoyó sobre una columna de elevación de precisión para poder ajustar la altura de la fotografía.

La frecuencia de filmado es de 5000 imágenes por segundo, esto hace que la velocidad de obturación sea muy elevada, lo que obliga a tener un punto de luz muy intenso para poder obtener imágenes claras.

Las principales dificultades a la hora de realizar las secuencias han sido elegir un objetivo adecuado que proporcionando un aumento considerable sin tener que acercar en exceso el objetivo al cono de vaporización (cosa no recomendable para no mojar el equipo fotográfico). También la elección de la iluminación planteo algunas dificultades a la hora de no proyectar sombras sobre la imagen y también sobre la orientación adecuada. Por último, el inconveniente menos problemático es que las secuencias han de ser rápidas no sólo por la limitación de memoria del equipo, si no también por evitar que se proyecten salpicaduras en las paredes del recipiente que enmascaren la fotografía.

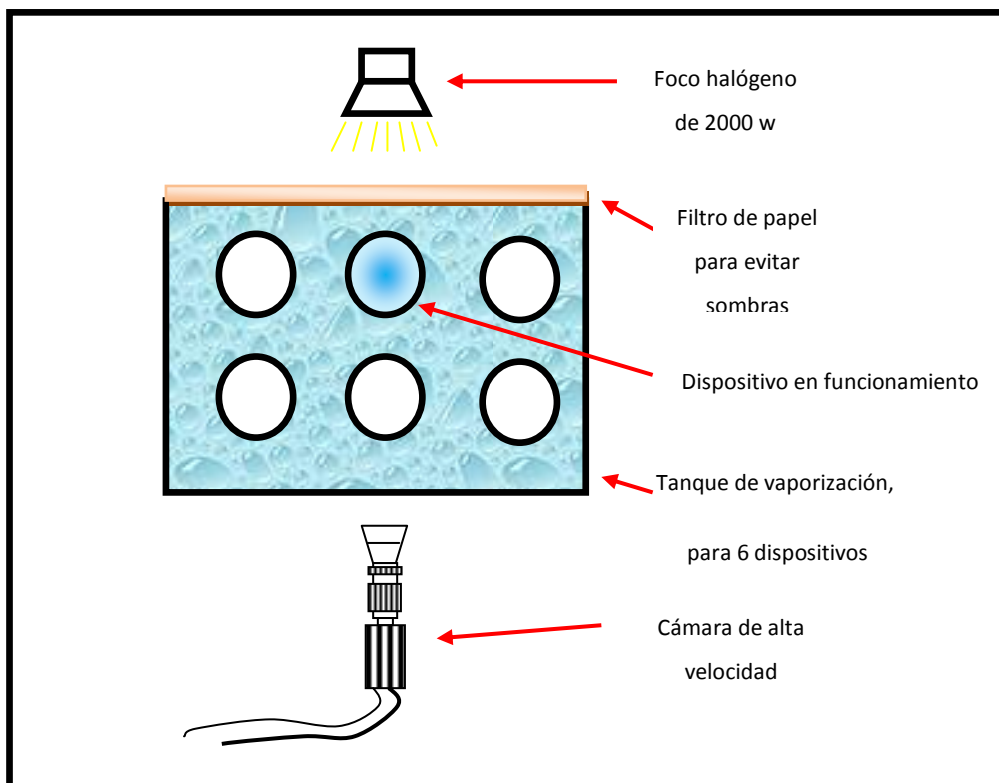


Figura 17: Esquema de disposición para fotografiado

#### 4.4. Medida del tamaño de gotas atomizado

Para comprobar los datos suministrados por el fabricante se midió el tamaño de gotas atomizadas.

Las medidas se hicieron con un difractor *Malvern RTS 54141*. Básicamente consta de un emisor laser y un receptor, el receptor mide mediante unos anillos la desviación que experimenta el haz de luz al atravesar las gotas de agua. Para ello se probaron dos métodos para realizarlas:

En el primero, el laser del difractor atravesaba el tanque de vidrio para 6 dispositivos pasando justo por encima del cono de atomización. El problema es atravesar las dos paredes de vidrio del recipiente, el cambio de medio produce refracción en el haz de luz con lo que la medida es incorrecta.

En el segundo, se utilizó el tanque de atomización para un dispositivo. Conduciendo con una corriente de aire la nube gotas atomizada para que atravesase el haz de luz y evitando los cambios de medio.

---

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y VISUALIZACIONES

---

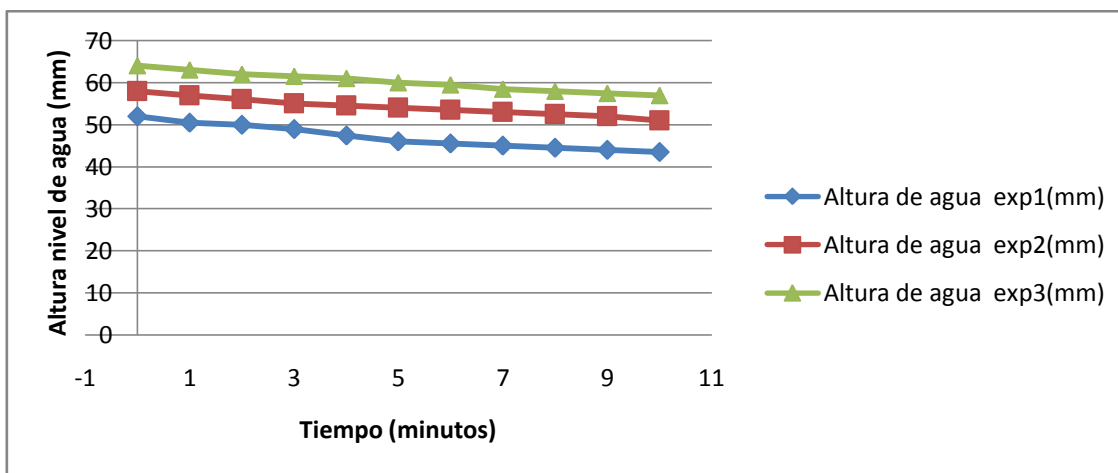
### 5.1. Resultados de los experimentos de medida del caudal atomizado

En este apartado se van a mostrar las curvas resumen de los caudales atomizados, así como las conclusiones y cualidades más relevantes de cada una de ellas. Debido a la cantidad de datos y curvas adicionales obtenidas se incluirán en anexos.

#### 5.1.1. Resultados de “Medida de caudal por variación del nivel de fluido”.

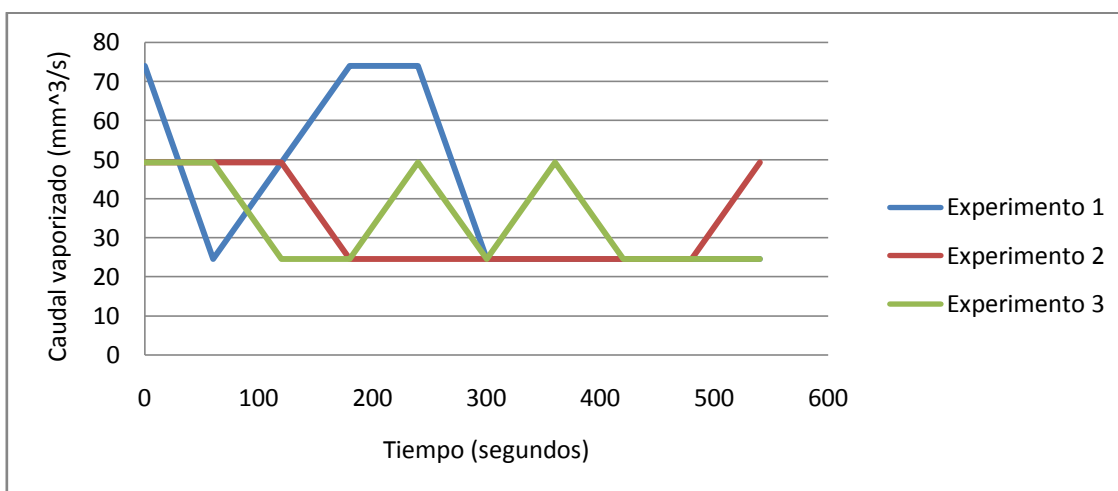
##### 5.1.1.1. *Medidas realizadas con distintos niveles de agua*

Las primeras medidas se realizaron con distintas alturas de agua (52, 58, 64 mm) dejando enfriar completamente el equipo entre medida y medida. Durante esta primera toma de contacto se aprecia un comportamiento muy similar entre experimentos.



Gráfica 1: Primeros experimentos

Los resultados tienen buen aspecto, pero si se analiza en caudal atomizado en detalle se aprecia dispersión de valores, aunque la principal limitación de este método, aparte de todos los inconvenientes comentados, se basa sobre todo en la poca resolución que ofrece el método. Sin entrar en equipos muy sofisticados, el instrumento de medida, la regla, únicamente da resolución de 1mm ( $2 \text{ cm}^3$ ) que equivale a millones de gotas atomizadas.

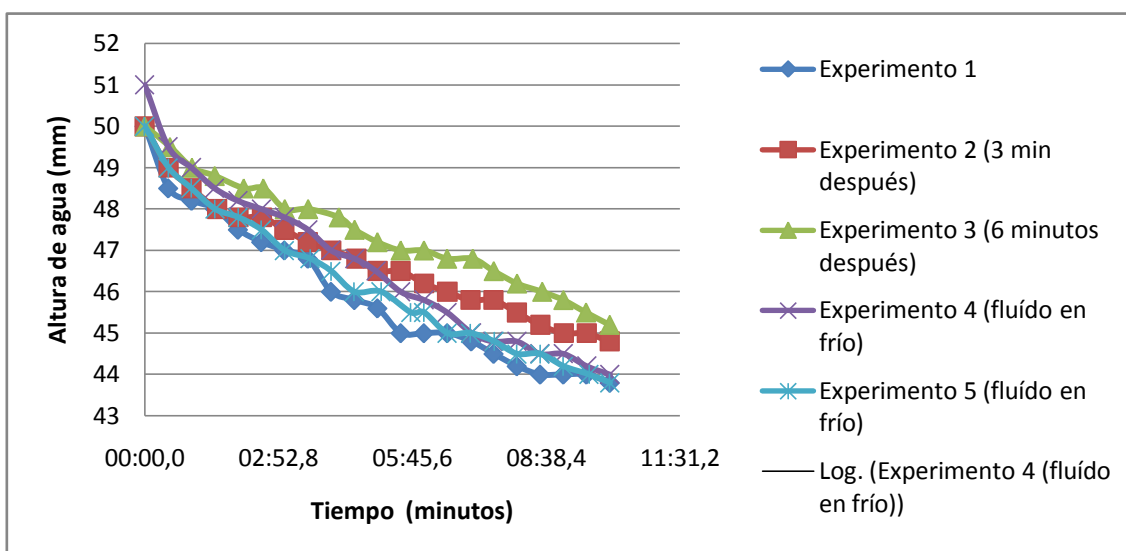


Gráfica 2: Caudales del primer experimento

### 5.1.1.2. Agua a distinta temperatura

En este caso se comprobó si un funcionamiento prolongado del dispositivo afecta a su rendimiento. Los resultados son que el disco no sufre degradación alguna con un uso prolongado, así como se aprecia en las medidas uno, cuatro y cinco (fluido y equipo completamente en frío), donde la cantidad de agua atomizada es idéntica.

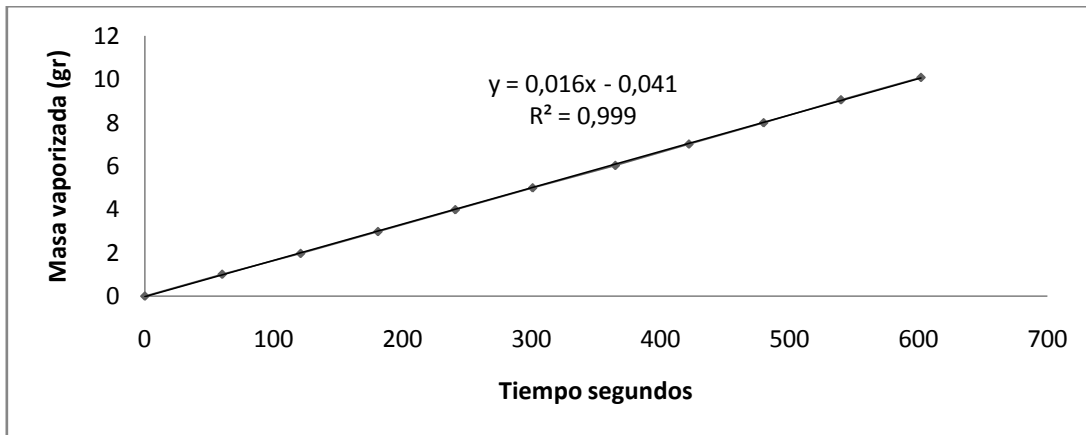
También se observa una pequeña reducción de rendimiento en los experimentos que no se ha dejado enfriar completamente el agua y el equipo. Este hecho no es relevante en primer lugar por la precisión del equipo y en segundo lugar porque, como se ve más adelante, el aumento de temperatura hace que se atomice mayor cantidad de fluido al disminuir la viscosidad del mismo.



Gráfica 3: Experimentos con agua a distinta temperatura

## 5.2. Resultados para experimentos realizados con balanza de precisión

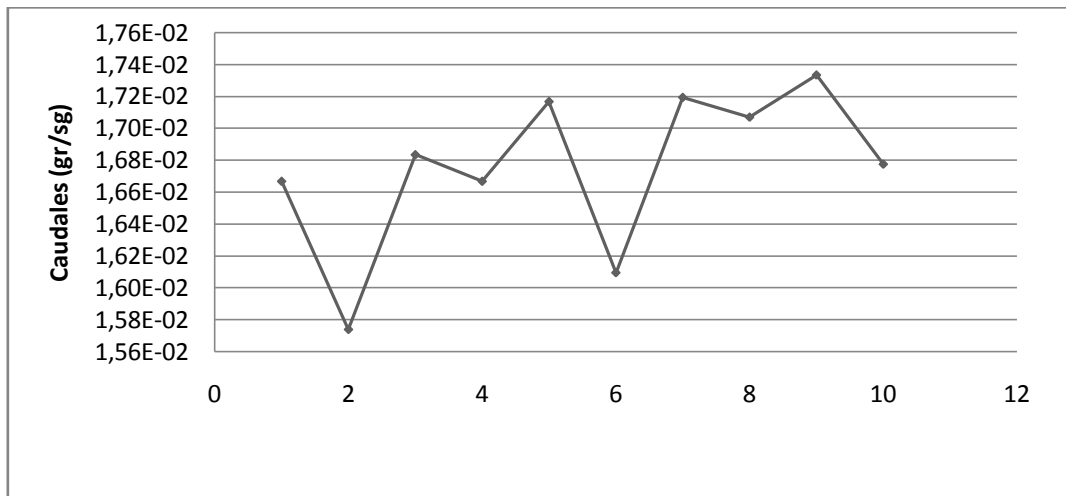
Las ventajas de este método además de las comentadas en el punto 4.1.2, es la propia resolución de la balanza, 0.01 gr. que equivalen a  $10 \text{ mm}^3$  de agua, una resolución mucho menor que en el caso anterior.



Gráfica 4: Masa atomizada experimento de prueba

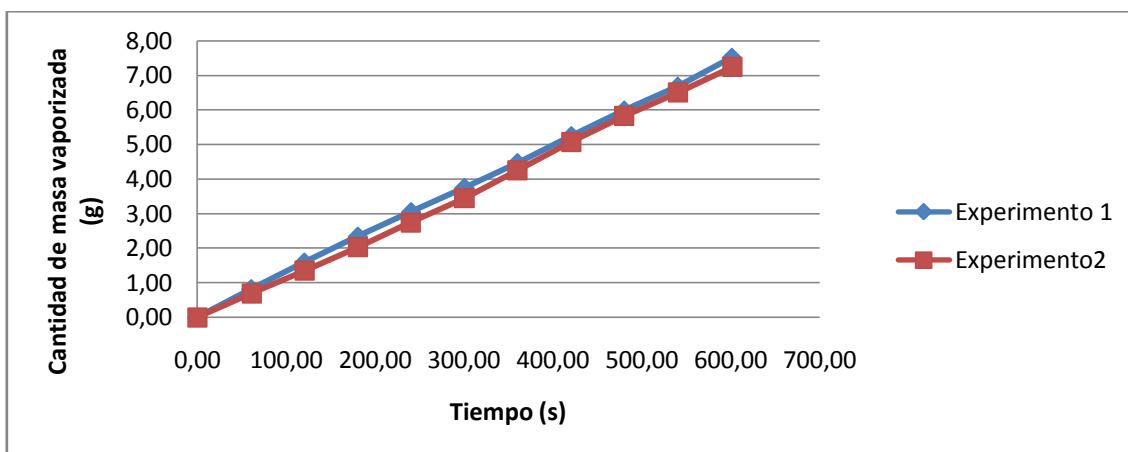
A la vista del primer experimento en el que la cantidad de agua atomizada se tiene un comportamiento cuasi lineal, aunque hay variaciones a lo largo de la medida la desviación en los caudales medidos es mucho menor que en la experiencia anterior con una desviación estándar de  $5,04 \cdot 10^{-4}$ , que comparado con la anterior  $2,57 \cdot 10^{-2}$ , indica que el método escogido es más adecuado que el anterior para la medida de caudal atomizado.

Por lo demás este experimento no aporta más información relevante pero ha servido para probar las mejoras realizadas en el montaje.

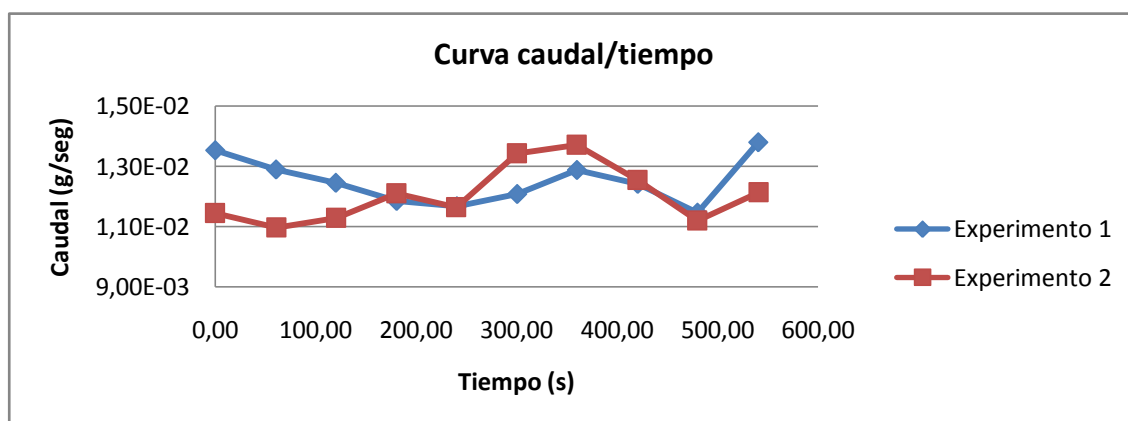


Gráfica 5: Medida de caudales de prueba

### 5.2.1. Resultados de experimentos de prueba con mezcla acuosa de glicerina al 21,05%



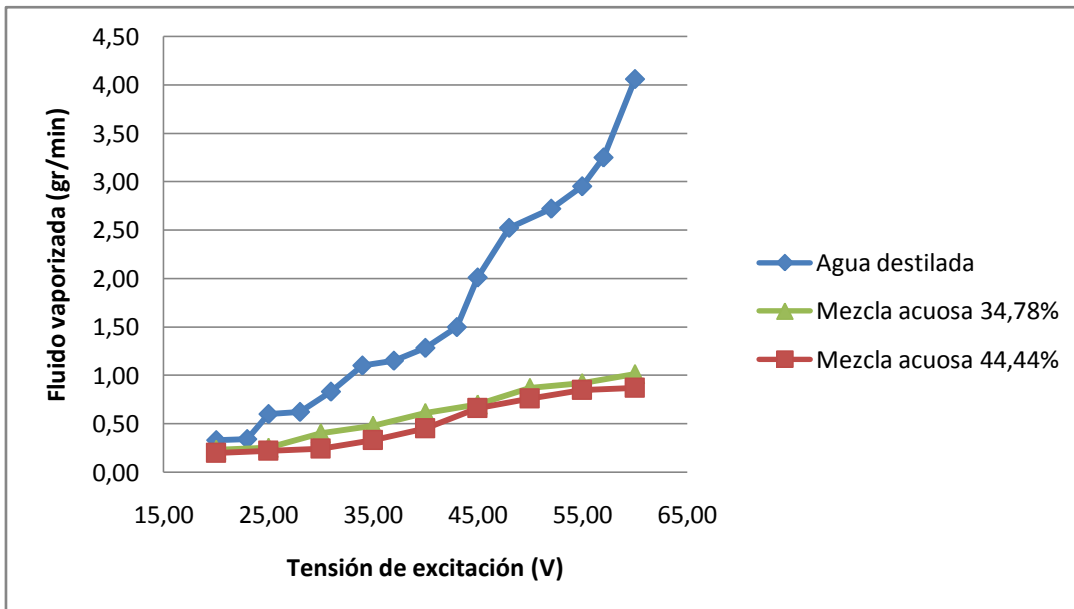
Gráfica 6: Masa atomizada de mezcla acuosa al 21,05% en volumen



Gráfica 7: Caudal atomizado

La intención de este experimento es doble, por un lado seguir probando el equipo y por otro comprobar el comportamiento de una mezcla de glicerina dentro del atomizador. Se aprecia que la dispersión en el rendimiento del equipo es muy similar a la del agua y en principio no hay problemas en atomizar glicerina. Resultados de experimentos realizados con distintas mezclas acuosas de glicerina a tensión variable





*Gráfica 8: Caudal de fluido atomizado con tensión variable y diferentes concentraciones de glicerina*

Los resultados están dentro de lo esperado, el caudal atomizado disminuye notablemente al aumentar la viscosidad del fluido. Los cambios de pendiente de las curvas están debidos en primer lugar al tomar medidas durante un minuto únicamente el disco presenta cambios de rendimiento. En segundo lugar, la evacuación del calor generado en el piezoeléctrico se realiza a través del fluido, con lo que la viscosidad disminuye. Este fenómeno tiene mayor importancia con concentraciones altas de glicerina.

### 5.2.2. Resultados de atomización con diferentes mezclas de glicerina a tensión variable y con muestras más largas

Como las curvas individuales de atomización para cada concentración son prácticamente lineales, para extraer el valor medio del caudal másico atomizado en (gr/min) se ha realizado una aproximación por mínimos cuadrados de la pendiente de cada curva.

En general, el equipo sigue un comportamiento lineal con las distintas mezclas. Como era de esperar el caudal atomizado disminuye al aumentar la concentración de glicerina (la viscosidad) al disminuir la tensión de alimentación.

El aumento de temperatura en la duración de las pruebas es de unos 7°C, aunque este fenómeno no tiene un efecto muy acusado, se ve fundamentalmente con concentraciones altas de glicerina que hay un ligero aumento de rendimiento al finalizar las pruebas.

Conforme aumenta la concentración de glicerina también se observa que la tensión mínima para que se produzca atomización aumenta y por ejemplo con una concentración del 80% la atomización no comienza hasta los 40 voltios.

Otro dato muy interesante es con una concentración del 80%, al conectar el dispositivo en principio no se produce atomización hasta que no pasa un lapso de tiempo y el fluido se calienta hasta 38,1 °C. Esto indica el valor máximo de viscosidad que puede atomizar el equipo que es  $2.66 \cdot 10^{-2}$  cSt.

Con concentraciones mayores del 80% en vol. también puede producirse atomización si se deja calentar el fluido lo suficiente. El principal inconveniente de realizar estas pruebas es el transistor de potencia del oscilador, al calentarse el fluido la disipación de calor se reduce, siendo fatal para el transistor. Por este motivo las pruebas se detuvieron en concentraciones al 80%.

### 5.3. Resultados de experimentos con tanque para 6 atomizadores.

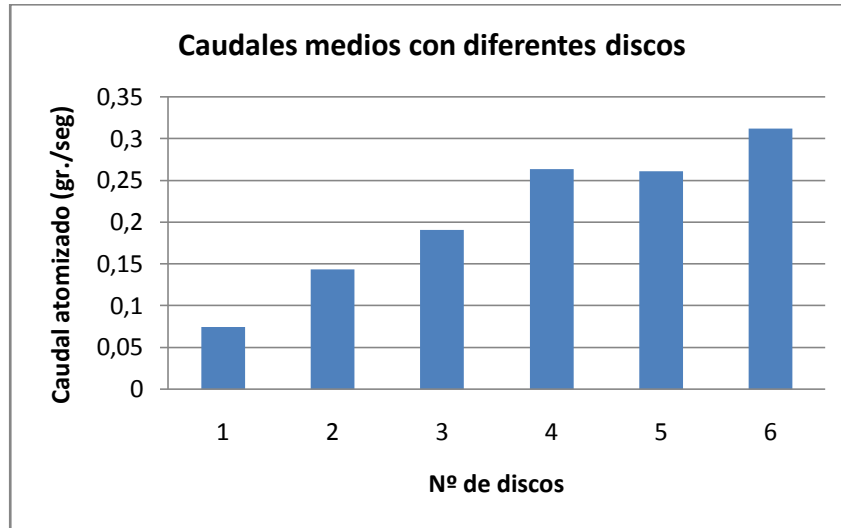


Figura 18: Caudales atomizados con varios atomizadores a la vez

En este caso se trataba de ver de manera orientativa como aumentaba el rendimiento del equipo, aunque hay que recordad que las medidas tienen poca precisión.

Se observa sin embargo, que el caudal atomizado no aumenta conforme lo hace el número de discos. Así pues, para 6 discos el caudal atomizado es 4 veces mayor. Sin embargo con las configuraciones para 2, 3 y 4 discos (se utilizaron los dispositivos más separados entre sí) proporción de caudal atomizado es más lineal. Así pues, se puede **postular** que las ondas generadas por los dispositivos ejercen algún tipo de interferencia entre sí.

## 5.4. Resultados las medidas de tamaño de gota atomizada

La principal inquietud con estas medidas es corroborar la formula de Lang, que da el diámetro de las gotas atomizadas ( $2\mu\text{m}$ ) y curiosamente coincide con la suministrada por el fabricante.

Aunque el tamaño de gotas suministrado por el fabricante roza los límites del difractor, las medidas obtenidas muestran cierta dispersión en el diámetro de las gotas. El mayor porcentaje de diámetros de gota medido es  $5\mu\text{m}$ , también hay gotas por encima de las  $10\mu\text{m}$  como era de esperar después de ver las fotografías de alta velocidad.

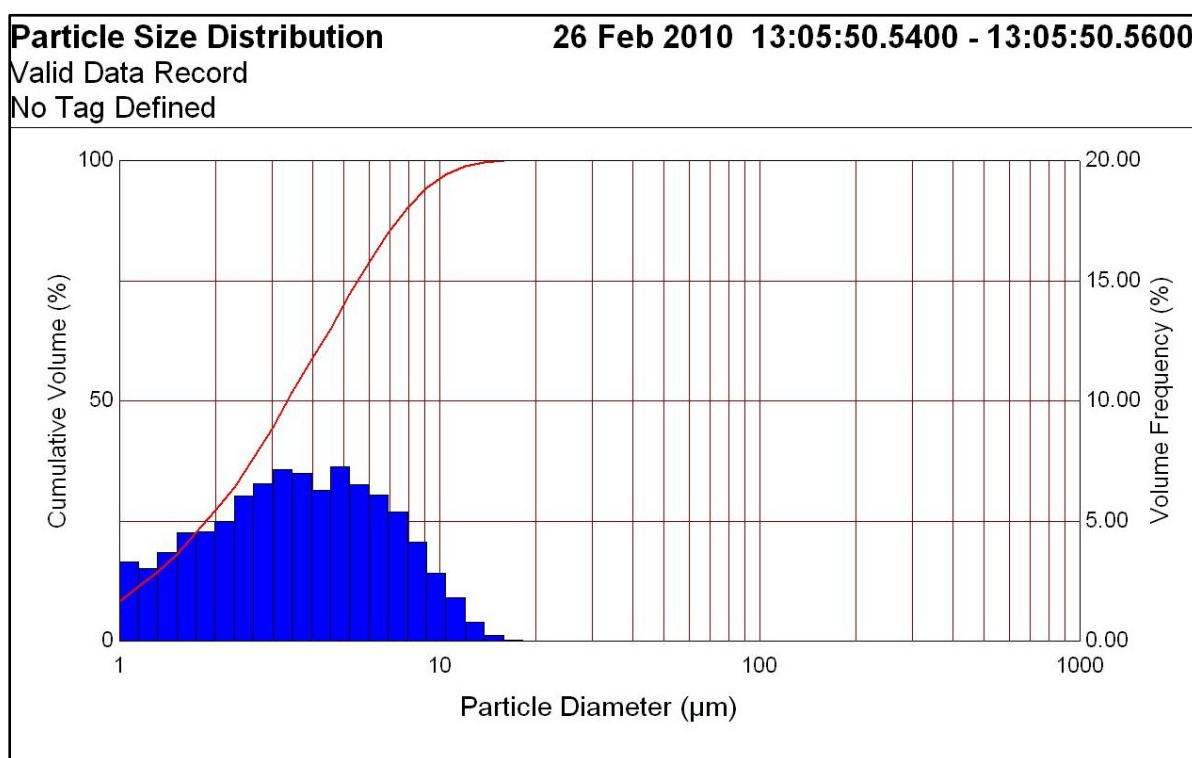


Figura 19: Distribución de tamaños de gota medidos con el difractor

En azul se muestra el porcentaje del volumen medido que corresponde a cada diámetro de gotas. La traza roja representa la frecuencia con la que se repite cada valor.

## 5.5. Caudal atomizado en función de la viscosidad del fluido.

El principal interés de mostrar los resultados en función de la viscosidad, reside en poder extrapolar los datos obtenidos a otros fluidos de viscosidad conocida y prever así su comportamiento.

Para ello aprovechando los valores de temperatura monitorizados en cada medida, se han obtenido las fórmulas de recurrencia de viscosidad y densidad de mezclas acuosas de glicerina a partir de unas tablas de “DOW chemical company”.

A las fórmulas de recurrencia ha habido que aproximarlas a un polinomio de grado 5, porque si no se ajustaban lo suficiente.

Las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

- Conversión de la concentración de glicerina en volumen en concentración en peso.

$$C_p = \frac{\rho_{GLI} C_v}{\rho_{GLI} C_v + \rho_{AGUA} (100 - C_v)}$$

*Ecuación 6: Conversión de concentración en volumen a concentración en peso*

Donde:  $C_p$  es la concentración de glicerina en peso y  $C_v$  es la concentración de glicerina en volumen.

- Fórmula de recurrencia de la densidad de una mezcla acuosa de glicerina, en función de la concentración (% en peso), la temperatura (°C) y la densidad expresada en kg/m<sup>3</sup>.

$$\rho(C,T) = \frac{C(0.0033T^2 - 0.4813T + 236)}{100} - 0.0033T^2 - 0.1145T + 1002$$

*Ecuación 7: Densidad de la mezcla en función de la temperatura y la concentración en glicerina*

- Fórmula de recurrencia de la viscosidad de una mezcla acuosa de glicerina en función de la concentración de glicerina (% en peso) y la temperatura (K). La viscosidad viene dada en centiPoises (cP).

$$\ln \mu = M0 + M1 * T + M2 * T^2$$

*Ecuación 8: viscosidad de la mezcla acuosa de glicerina en función de la temperatura y la concentración de glicerina*

Con:

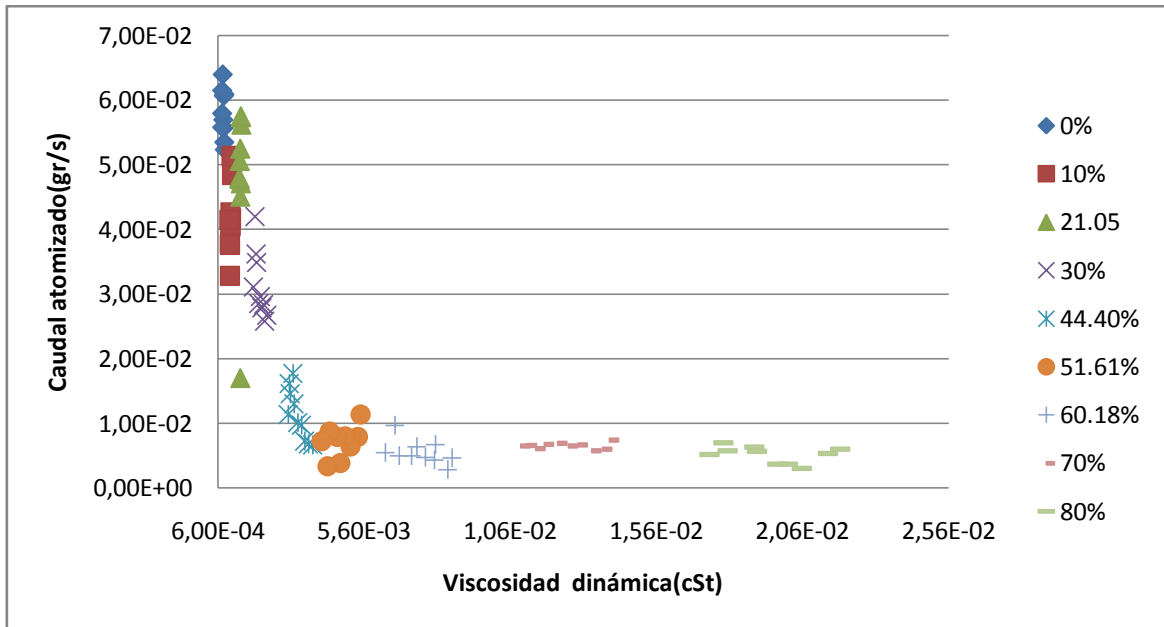
$$M0 = 20.141 + 0.230C - 0.003065C^2 + 0.0000756C^3$$

$$M1 = 0.1125 + 0.001144C - 0.0000168C^2 + 0.000000407C^3$$

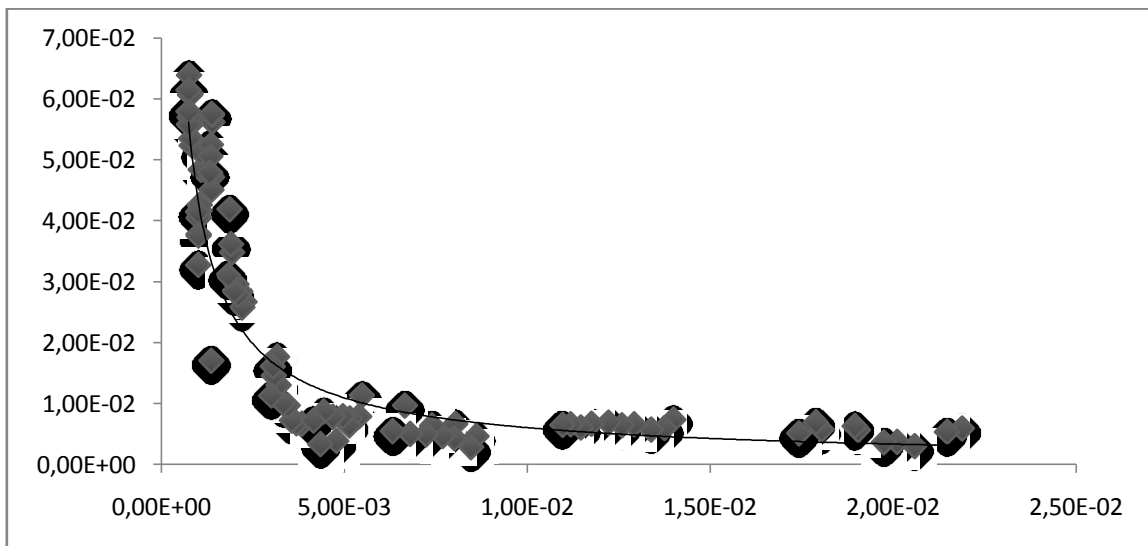
$$M2 = 0.000149 + 0.0000015C - 0.000000023C^2 + 0.00000000057C^3$$

Los datos obtenidos, como era de suponer, reflejan la disminución del caudal atomizado con forme aumenta la viscosidad. En general, las curvas en función de las viscosidades son similares. Hay algunas irregularidades, que se cree, son debidas a otros parámetros como coeficientes de compresibilidad o de dilatación.

A continuación se muestran los caudales atomizados a 60 voltios por ser la curva más representativa y la que indica las capacidades nominales del atomizador.



Gráfica 9: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 60 voltios



Gráfica 10: Tendencia de disminución del caudal atomizado con forme aumenta la viscosidad





---

## 6. CONCLUSIONES

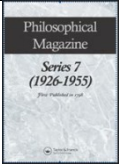


---



- Conclusiones extraídas de los datos
  - Los discos no sufren degradación apreciable con el uso, siempre y cuando estén inmersos en fluido (aunque hay que tener en cuenta el calor específico del mismo).
  - El caudal atomizado depende fuertemente de la viscosidad, como se ve en la reducción de caudal que aparece al aumentar la viscosidad y en el ligero aumento de caudal que aparece con el calentamiento del fluido.
  - El descenso de la viscosidad del fluido debido al aumento de temperatura, permitiría la atomización de un amplio espectro de fluidos (incluyendo aceite de motor si se calienta lo suficiente). Aunque claro está, habría que asegurar la integridad del equipo refrigerándolo por otros métodos.
  - También cabe la posibilidad de atomizar sustancias más viscosas, u obtener caudales más altos si se aumenta la tensión de excitación. Aunque este oscilador no soporta tensiones de alimentación superiores a 48 voltios eficaces (67,88 V), con otro tipo de oscilador sería posible.
  - Como los mejores rendimientos de caudal atomizado se obtienen con bajas viscosidades, esta técnica es muy apropiada en principio para atomizar hidrocarburos con baja viscosidad como gasolina o etanol.

- Conclusiones obtenidas de las experiencias en el laboratorio
  - El caudal atomizado también depende en gran medida de la altura de la lámina de agua que tiene encima, es conveniente usar un sistema que la mantenga constante para obtener un rendimiento óptimo.
  - La geometría del cono (altura y anchura) depende fuertemente de la viscosidad del fluido a atomizar.
  - La temperatura del fluido se incrementa notablemente en la punta alcanzando valores cercanos a los 90°C.
  - En la práctica se han visto varios indicios de que se produzca cavitación en el seno del fluido. El más destacado es la degradación de la mezcla para concentraciones altas de glicerina después de algún tiempo, depositándose una capa de carbonilla encima del disco y adquiriendo la mezcla un tono marrón. También en las imágenes tomadas con la cámara de alta velocidad se observan “explosiones” a lo largo del cono de atomización y la proyección de gotas de gran tamaño procedentes del cono.
  - La avería más frecuente de los dispositivos es la destrucción del componente, o la fusión de la resistencia fusible.


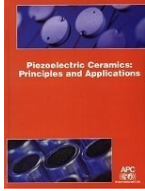
## 7. BIBLIOGRAFÍA

### Artículos y publicaciones

<b>High-Frequency Ultrasonic Atomization With Pulsed Excitation</b> , Journal of fluid engineering - ASME, A. Lozano, F. Barreras, H. Amaveda, X. Jordá, M. Lozano, noviembre 2003	
<b>Sistema de excitación por pulsos para la caracterización de resonadores para atomización</b> , Boletín de la sociedad española de la cerámica y el vidrio	
<b>Transient high – frequency ultrasonic water atomization</b> , Experiments in Fluids 33 (2002) 405–413 DOI 10.1007/s00348-002-0456-1, F. Barreras, H. Amaveda, A. Lozano, 2002	
<b>The physical and biological effects of high frequency sound-waves of great intensity</b> , Wood WR, Loomis AL (1927), Phil Mag 4:417–437	
<b>On the forms and states assumed by fluids in contact with vibrating elastic surfaces</b> , Faraday M (1831), Phil Trans R Soc London 52:319–340	
<b>Hydrokinetic solutions and observations</b> , Kelvin Lord (W Thomson) (1871) Phil Mag 42:362–377	
<b>On the crispation of fluid resting upon a vibrating support</b> , Rayleigh L (1883) Phil Mag 15:50–58	
<b>The mechanism of the formation of fogs by ultrasonic waves</b> , Söllner K (1936a) Trans Faraday Soc 32:1532–1536	

<b>Experiments to demonstrate cavitation caused by ultrasonic waves</b> , Söllner K (1936b), Trans Faraday Soc 32:1537–1538	
<b>The effect of fountain formation at the surface of a vertically oscillating liquid</b> , Sorokin VI (1957) Soviet Phys Acoust 3:281–291	
<b>Dynamic properties of surface tension of water and aqueous solutions of surface active agents with standing capillary waves in the frequency range from 10 kHz to 1.5 MHz</b> . Eisenmenger W (1959) Acoustica 9:327–340	
<b>The stability of the plane free surface of a liquid in vertical periodic motion</b> , Benjamin TB, Ursell F (1954) Proc R Soc London A 225:505–515	




#### Literatura temática y tesis doctorales

<b>Generación de gotas microscópicas y caracterización de aerosoles</b> DOCTORANDO: Hippolyte Amaveda UNIVERSIDAD: Zaragoza FACULTAD/ESCUELA: Centro Politécnico Superior AÑO: 2003 CALIFICACIÓN: Sobresaliente Cum Laude	
<b>Piezo electric ceramics: principles and applications</b> , APC international Ltd., Mackeyville Pa. 17750 USA <a href="http://www.americanpiezo.com">http://www.americanpiezo.com</a>	

Apuntes externos

<b>Osciladores sinusoidales 1ª parte</b> , Ing. Oscar M. Santa Cruz, 2008 <a href="http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Aplicada/Cap01Osciladores1parte.pdf">http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Aplicada/Cap01Osciladores1parte.pdf</a>	
<b>Osciladores sinusoidales 2ª parte</b> , Ing. Oscar M. Santa Cruz, 2008 <a href="http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Aplicada/Cap01Osciladores2parte.pdf">http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Aplicada/Cap01Osciladores2parte.pdf</a>	
<b>Oscilador colpitts</b> , Francisco Jiménez Molinos, 2006 <a href="http://www.uqr.es/~jmolinofiles/colpitts2006.pdf">http://www.uqr.es/~jmolinofiles/colpitts2006.pdf</a>	
<b>Osciladores sinusoidales</b> , Federico Miyara, 2 edición, 2004 <a href="http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/oscilad.pdf">http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/oscilad.pdf</a>	

Otras referencias

<b>Tabla de viscosidad de la glicerina</b> , The DOW Chemical company <a href="http://www.dow.com/glycerine/resources/table18.htm">http://www.dow.com/glycerine/resources/table18.htm</a>	
<b>Tabla de densidad de la glicerina</b> , The DOW Chemical company <a href="http://www.dow.com/glycerine/resources/dens_sq.htm">http://www.dow.com/glycerine/resources/dens_sq.htm</a>	
<b>Ficha de seguridad de la glicerina, glicerol</b> , Fichas de seguridad (MSDS) <a href="http://www.fichasdeseguridad.com/glicerina.htm">http://www.fichasdeseguridad.com/glicerina.htm</a>	



---

## 8. ANEXOS

---

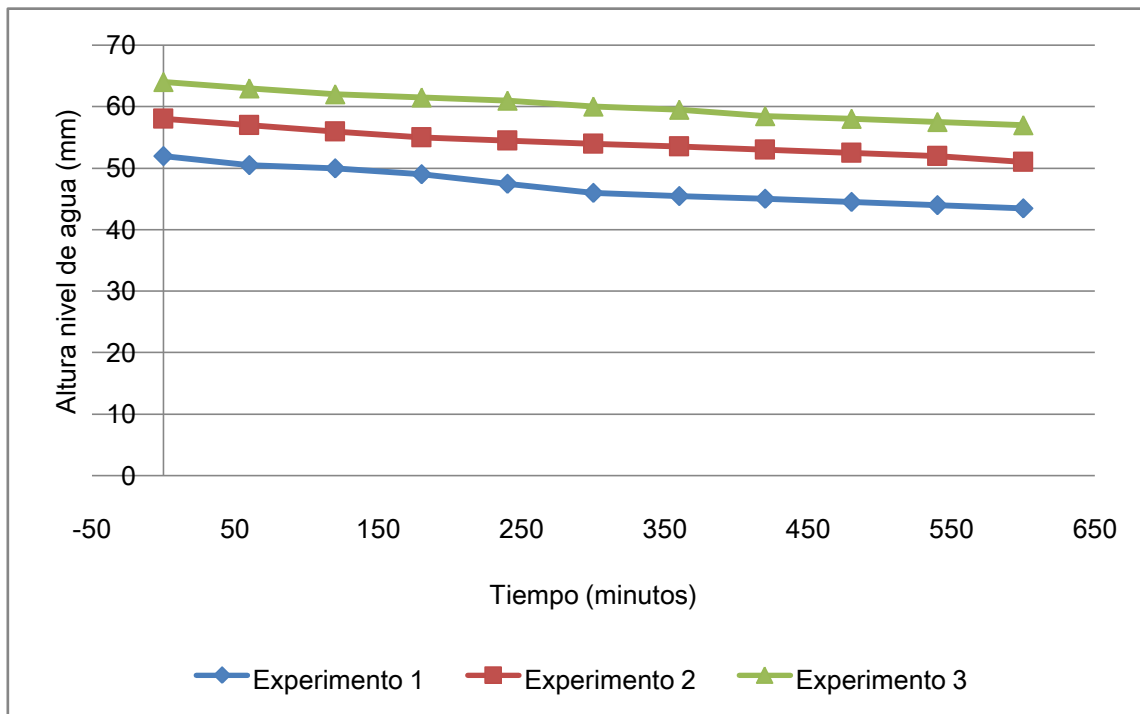
## 8.1. Tablas y gráficas de medida del caudal con decremento de la altura de fluido.

### 8.1.1. Primer experimento

Tiempo (seg)	Altura de fluido			Volumen de fluido (mm <sup>3</sup> )		
	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Volumen exp1	Volumen exp2	Volumen exp3
0	52	58	64	153886,72	171642,88	189399,04
60	50,5	57	63	149447,68	168683,52	186439,68
120	50	56	62	147968,00	165724,16	183480,32
180	49	55	61,5	145008,64	162764,80	182000,64
240	47,5	54,5	61	140569,60	161285,12	180520,96
300	46	54	60	136130,56	159805,44	177561,60
360	45,5	53,5	59,5	134650,88	158325,76	176081,92
420	45	53	58,5	133171,20	156846,08	173122,56
480	44,5	52,5	58	131691,52	155366,40	171642,88
540	44	52	57,5	130211,84	153886,72	170163,20
600	43,5	51	57	128732,16	150927,36	168683,52
<b>Caudal medio (mm<sup>3</sup>/seg)</b>	<b>42,60</b>	<b>31,61</b>	<b>34,30</b>			

Tabla 4: Resultados primeros experimentos



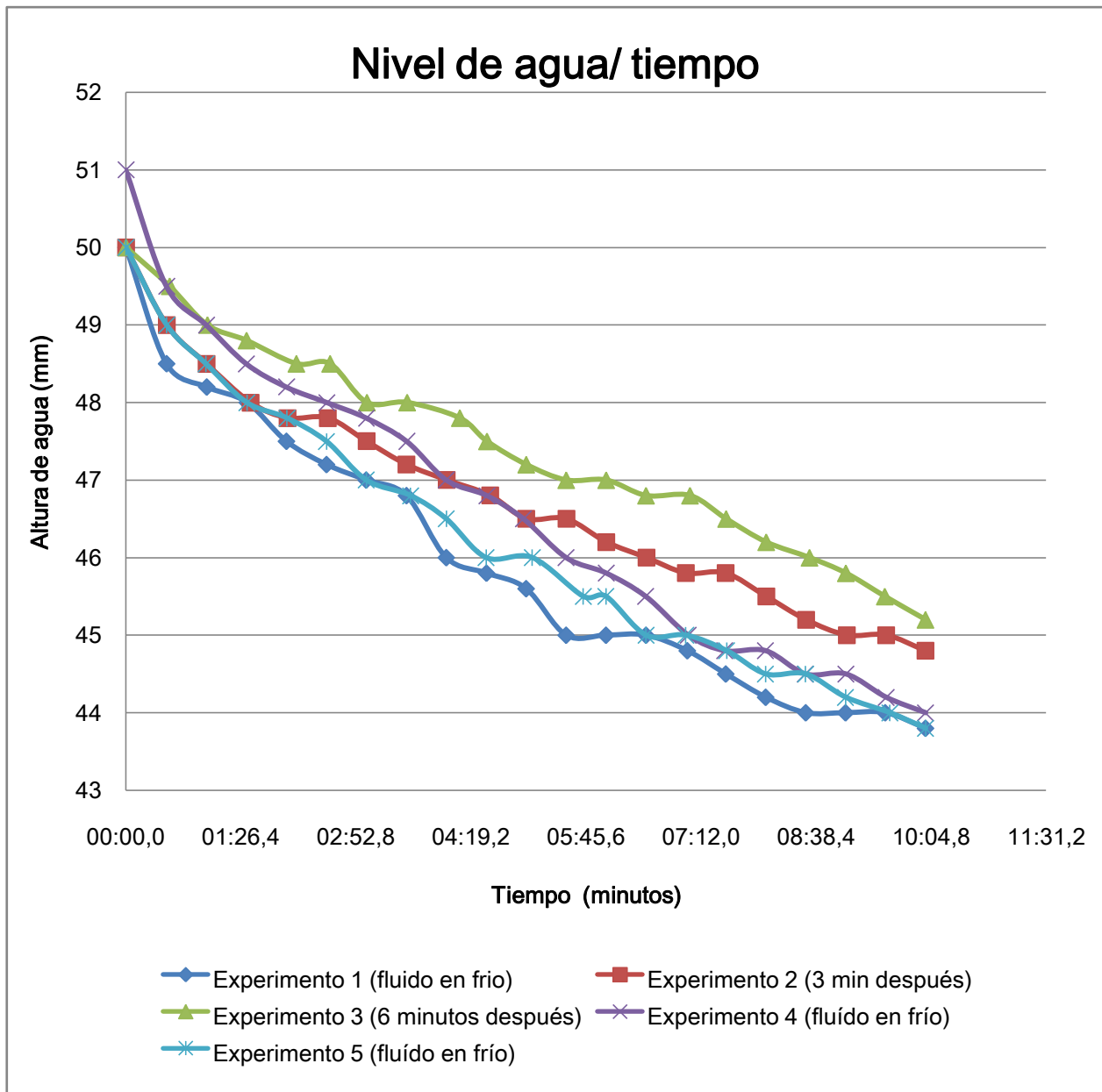


Gráfica 11: Caudal – Tiempo. Primeros experimentos

## 8.1.2. Tablas de datos de experimentos con agua a distinta temperatura

Experimento 1 (fluido en frío)		Experimento 2 (3 min después)		Experimento 3 (6 minutos después)		Experimento 4 (fluido en frío)		Experimento 5 (fluido en frío)	
Tiempo	Altura	Tiempo	Altura	Tiempo	Altura	Tiempo	Altura	Tiempo	Altura
00:00,0	50,00	00:00,0	50,00	00:00,0	50,00	00:00,0	51,00	00:00,0	50,00
00:30,4	48,50	00:30,7	49,00	00:32,7	49,50	00:30,4	49,50	00:30,6	49,00
01:00,6	48,20	01:00,5	48,50	01:01,1	49,00	01:00,4	49,00	01:00,0	48,50
01:31,0	48,00	01:33,6	48,00	01:30,5	48,80	01:30,4	48,50	01:30,7	48,00
02:00,5	47,50	02:01,4	47,80	02:08,0	48,50	02:00,4	48,20	02:00,8	47,80
02:30,6	47,20	02:31,6	47,80	02:33,3	48,50	02:30,9	48,00	02:30,5	47,50
03:00,4	47,00	03:00,6	47,50	03:01,0	48,00	03:00,6	47,80	03:00,5	47,00
03:30,7	46,80	03:30,7	47,20	03:31,2	48,00	03:30,8	47,50	03:33,7	46,80
04:00,6	46,00	04:00,9	47,00	04:10,8	47,80	04:00,7	47,00	04:00,6	46,50
04:30,8	45,80	04:33,6	46,80	04:31,1	47,50	04:31,1	46,80	04:30,5	46,00
05:00,5	45,60	05:00,7	46,50	05:00,6	47,20	04:58,6	46,50	05:05,2	46,00
05:30,6	45,00	05:30,6	46,50	05:30,7	47,00	05:30,6	46,00	05:43,5	45,50
06:00,5	45,00	06:00,8	46,20	06:00,7	47,00	06:00,8	45,80	06:00,6	45,50
06:30,6	45,00	06:30,7	46,00	06:30,6	46,80	06:30,4	45,50	06:30,6	45,00
07:01,6	44,80	07:00,6	45,80	07:03,7	46,80	07:02,4	45,00	07:00,5	45,00
07:30,5	44,50	07:30,3	45,80	07:30,8	46,50	07:29,8	44,80	07:31,2	44,80
08:00,5	44,20	08:00,9	45,50	08:00,9	46,20	08:00,5	44,80	08:00,4	44,50
08:30,6	44,00	08:30,6	45,20	08:33,5	46,00	08:30,3	44,50	08:30,4	44,50
09:00,5	44,00	09:01,2	45,00	09:00,8	45,80	09:00,7	44,50	09:09:01	44,20
09:30,3	44,00	09:30,7	45,00	09:30,0	45,50	09:30,9	44,20	09:33,8	44,00
10:00,6	43,80	10:00,4	44,80	10:00,6	45,20	10:00,6	44,00	10:00,6	43,80

Tabla 5: Tabla de datos altura/tiempo de los experimentos a distinta temperatura



Gráfica 12: Curva altura de fluido- tiempo con el agua a distintas temperaturas

Caudales medios obtenidos por una aproximación por mínimos cuadrados de la curva anterior, multiplicando la altura del recipiente por la sección para obtener el volumen de fluido.

Experimento	1	2	3	4	5
Caudal medio (mm <sup>3</sup> /seg)	27,4	22,0	21,0	30,5	27,5

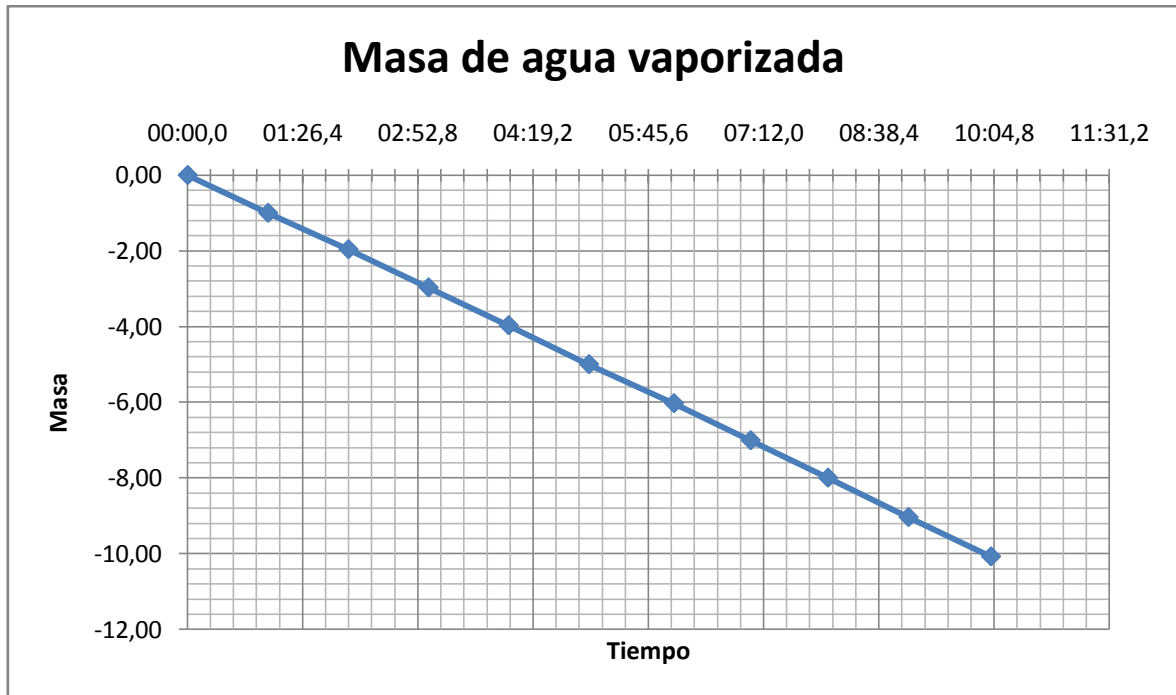
Tabla 6: Caudales medios de los experimentos con agua a diferentes temperaturas

## 8.2. Tablas y gráficas de los experimentos realizados midiendo el caudal atomizado con balanza de precisión

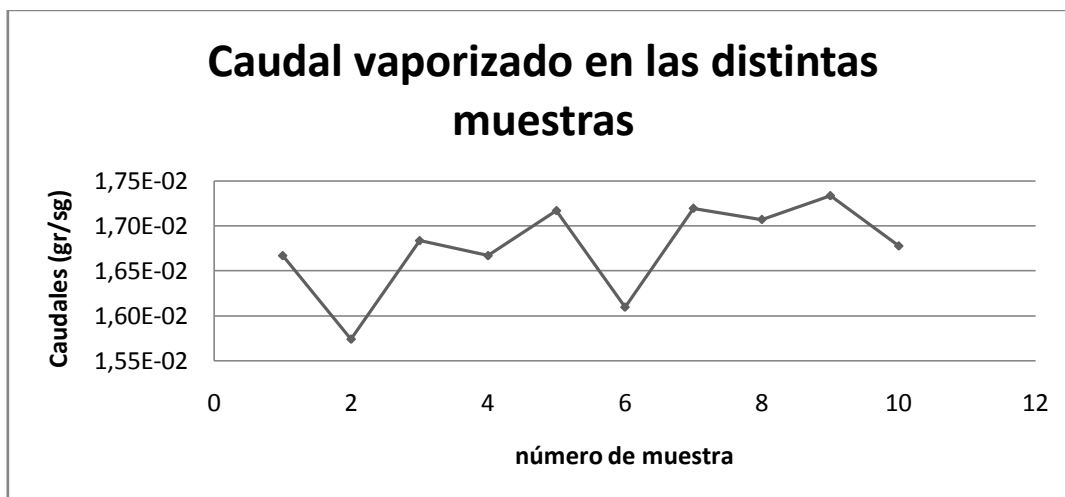
### 8.2.1. Tablas de datos de experimentos de prueba con balanza de precisión

Tiempo (sg)	Masa (gr.)	$\Delta$ masa (gr)	$\Delta$ tiempo (sg)	Q (gr/seg)
0,00	0,00	60,00	1,00	1,67E-02
60,00	1,00	61,00	0,96	1,57E-02
121,00	1,96	60,00	1,01	1,68E-02
181,00	2,97	60,00	1,00	1,67E-02
241,00	3,97	60,00	1,03	1,72E-02
301,00	5,00	64,00	1,03	1,61E-02
365,00	6,03	57,00	0,98	1,72E-02
422,00	7,01	58,00	0,99	1,71E-02
480,00	8,00	60,00	1,04	1,73E-02
540,00	9,04	62,00	1,04	1,68E-02
602,00	10,08			

Tabla 7: Datos de pruebas midiendo el caudal con la balanza de precisión



Gráfica 13: agua atomizada en la primera prueba con la balanza de precisión



Gráfica 14: Caudal atomizado en las distintas muestras de prueba con la balanza de precisión

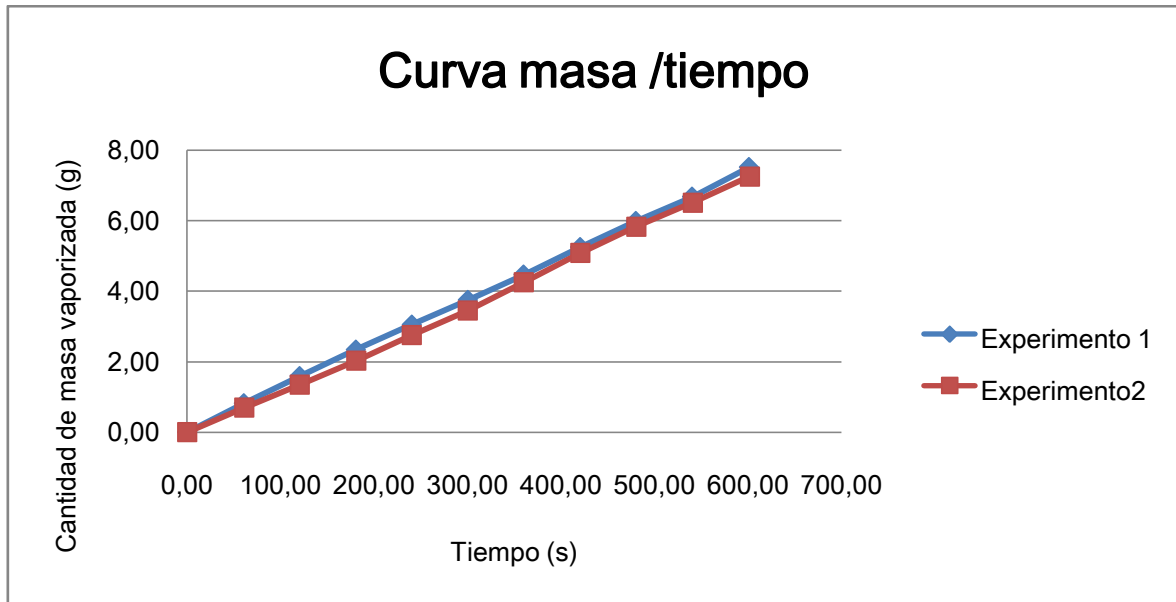
Caudal másico medio obtenido por aproximación por mínimos cuadrados de la curva masa de agua atomizada – tiempo es de  $1,68 \cdot 10^{-2}$  gr/seg.

## 8.2.2. Datos de los experimentos de prueba con mezclas acuosas de glicerina.

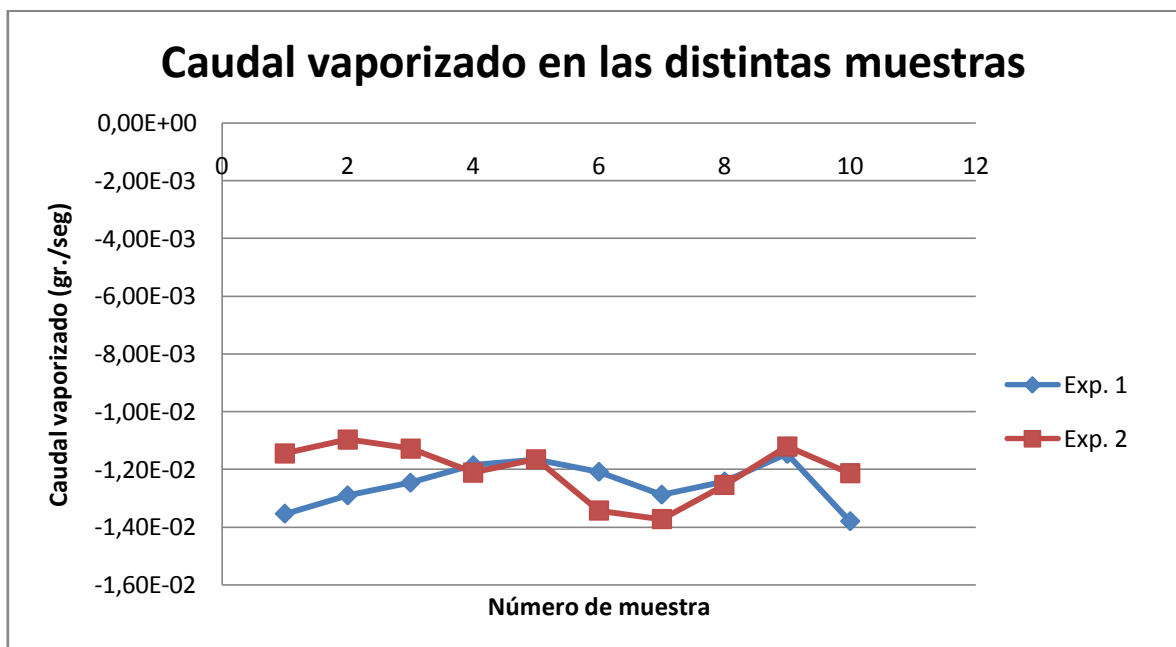
Las muestras de prueba se realizaron con una mezcla acuosa de glicerina al 21,05% en volumen.

Experimento 1					Experimento 2				
altura inicial 15mm					altura inicial 13 mm				
altura final 13 mm					altura final 11 mm				
Tiempo	Masa (g)	$\Delta$ Masa (g)	$\Delta t$ (s)	Q(g/s)	Tiempo	Masa (g)	$\Delta$ Masa (g)	$\Delta t$ (s)	Q (g/s)
0,00	0	0	0		0,00	0	0	0	
60,60	-0,82	-0,82	60,60	-1,35E-02	61,20	-0,7	-0,70	61,20	-1,14E-02
120,30	-1,59	-0,77	59,70	-1,29E-02	120,50	-1,35	-0,65	59,30	-1,10E-02
180,50	-2,34	-0,75	60,20	-1,25E-02	180,80	-2,03	-0,68	60,30	-1,13E-02
240,40	-3,05	-0,71	59,90	-1,19E-02	240,30	-2,75	-0,72	59,50	-1,21E-02
300,40	-3,75	-0,70	60,00	-1,17E-02	300,40	-3,45	-0,70	60,10	-1,16E-02
360,00	-4,47	-0,72	59,60	-1,21E-02	360,00	-4,25	-0,80	59,60	-1,34E-02
420,60	-5,25	-0,78	60,60	-1,29E-02	420,50	-5,08	-0,83	60,50	-1,37E-02
480,20	-5,99	-0,74	59,60	-1,24E-02	480,30	-5,83	-0,75	59,80	-1,25E-02
540,40	-6,68	-0,69	60,20	-1,15E-02	541,00	-6,51	-0,68	60,70	-1,12E-02
601,30	-7,52	-0,84	60,90	-1,38E-02	602,00	-7,25	-0,74	61,00	-1,21E-02

Gráfica 15: Tabla de datos de experimentos de prueba con mezclas acuosas de glicerina



Gráfica 16: Curvas de fluido atomizado en la prueba con mezcla acuosa de glicerina



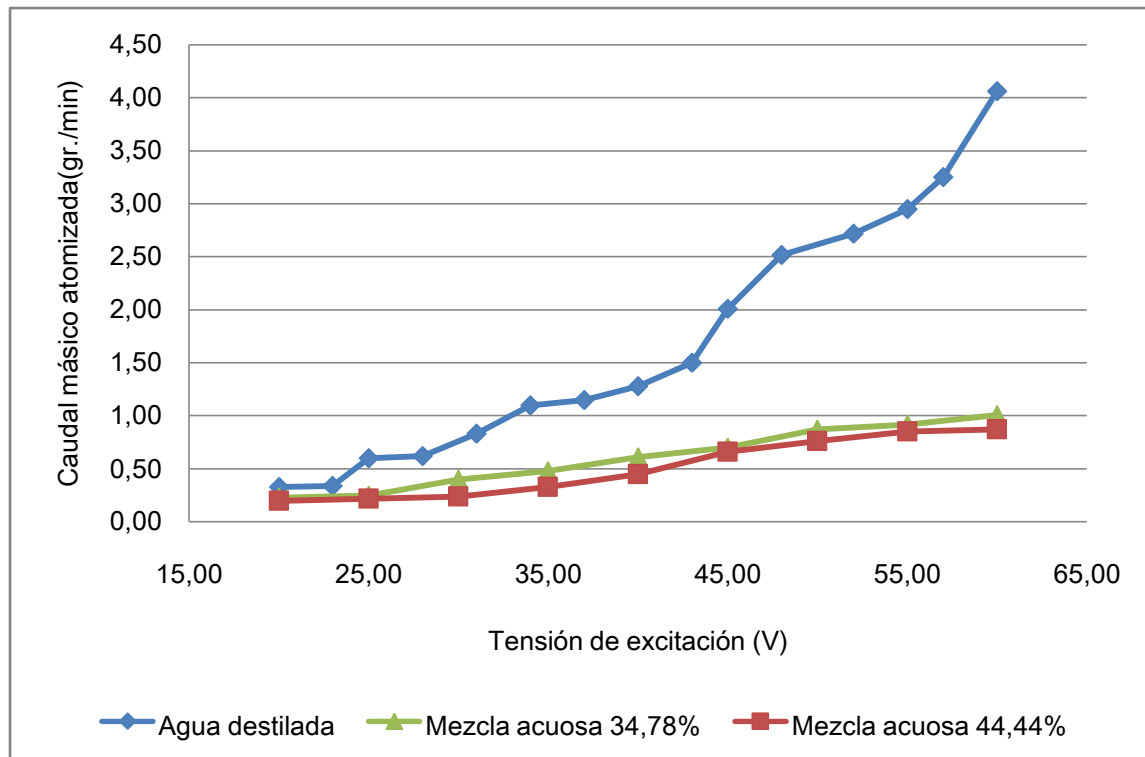
Gráfica 17: Caudal atomizado en las distintas muestras con las mezclas acuosas de glicerina

Experimento	1	2
Caudal medio (gr./seg)	1,23E-02	1,22E-02

Tabla 8: Caudales medios medidos con mezcla acuosa al 21,05%

### 8.2.3. Medida de caudal con tensión variable y diferentes viscosidades

- Gráficas resumen



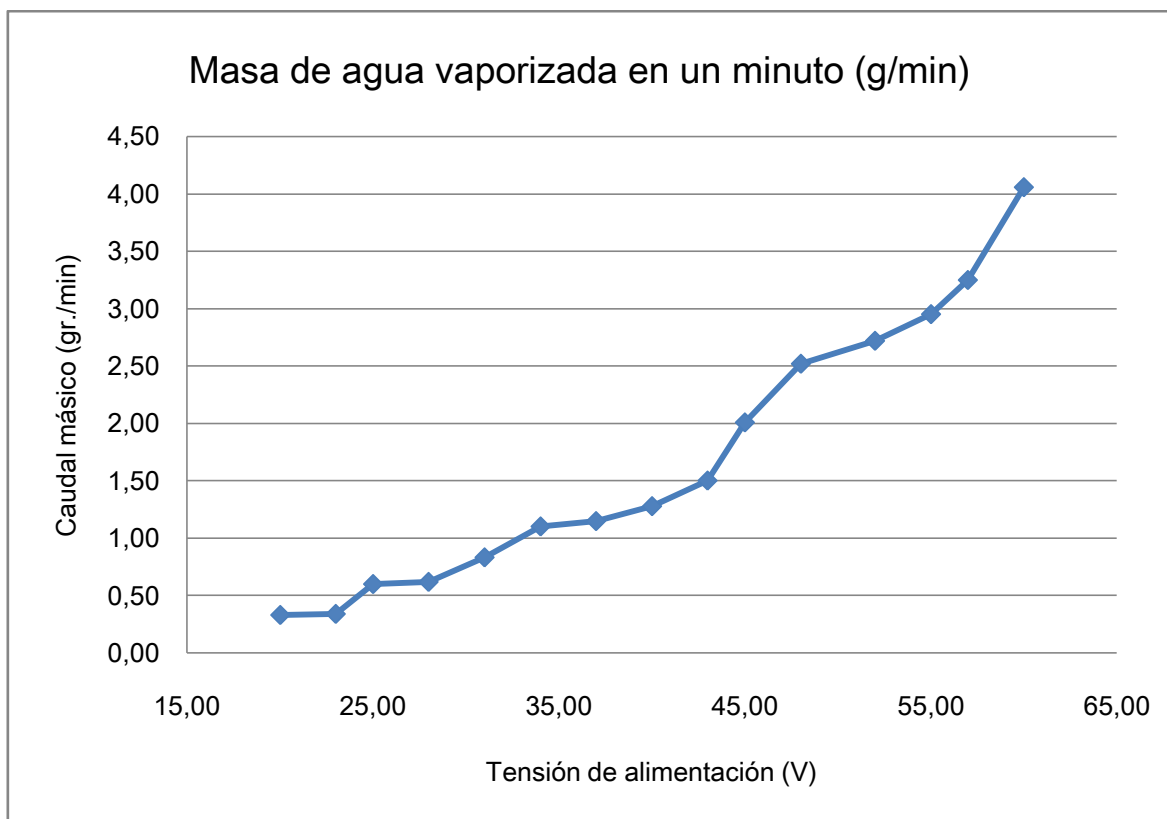
Gráfica 18: Resumen del caudal másico atomizado con diferentes concentraciones de glicerina en un minuto y con tensión variable



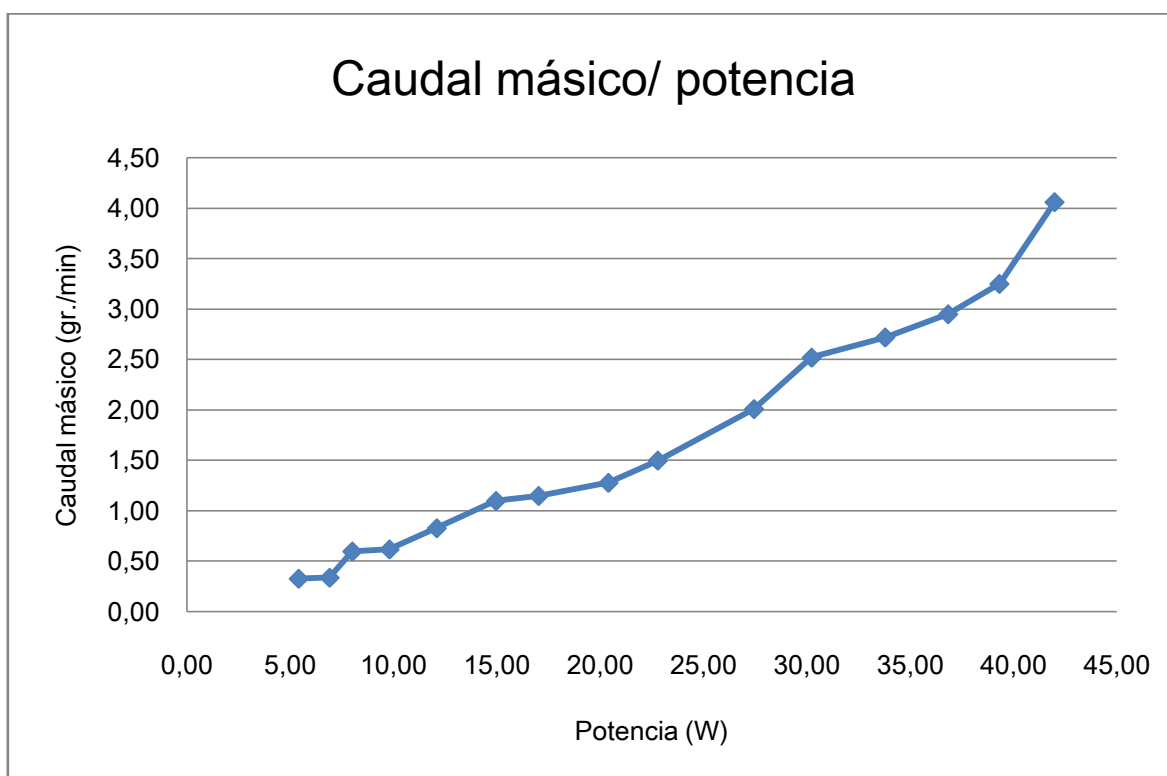
- Medidas con agua destilada

Tensión de entrada (V)	Masa de agua atomizada por minuto(g/min)	Corriente de entrada (A)	Potencia media (W)
0,00	-	0,00	0,00
3,00	-	0,00	0,00
6,00	-	0,03	0,18
9,00	-	0,09	0,81
12,00	-	0,14	1,68
15,00	-	0,20	3,00
17,00	-	0,23	3,91
20,00	0,33	0,27	5,40
23,00	0,34	0,30	6,90
25,00	0,60	0,32	8,00
28,00	0,62	0,35	9,80
31,00	0,83	0,39	12,09
34,00	1,10	0,44	14,96
37,00	1,15	0,46	17,02
40,00	1,28	0,51	20,40
43,00	1,50	0,53	22,79
45,00	2,01	0,61	27,45
48,00	2,52	0,63	30,24
52,00	2,72	0,65	33,80
55,00	2,95	0,67	36,85
57,00	3,25	0,69	39,33
60,00	4,06	0,70	42,00

Tabla 9: tabla de datos de curva a tensión variable con muestras cada 60 seg. para agua destilada



Gráfica 19: masa de agua atomizada con tensión variable y muestreos cada 60 segundos

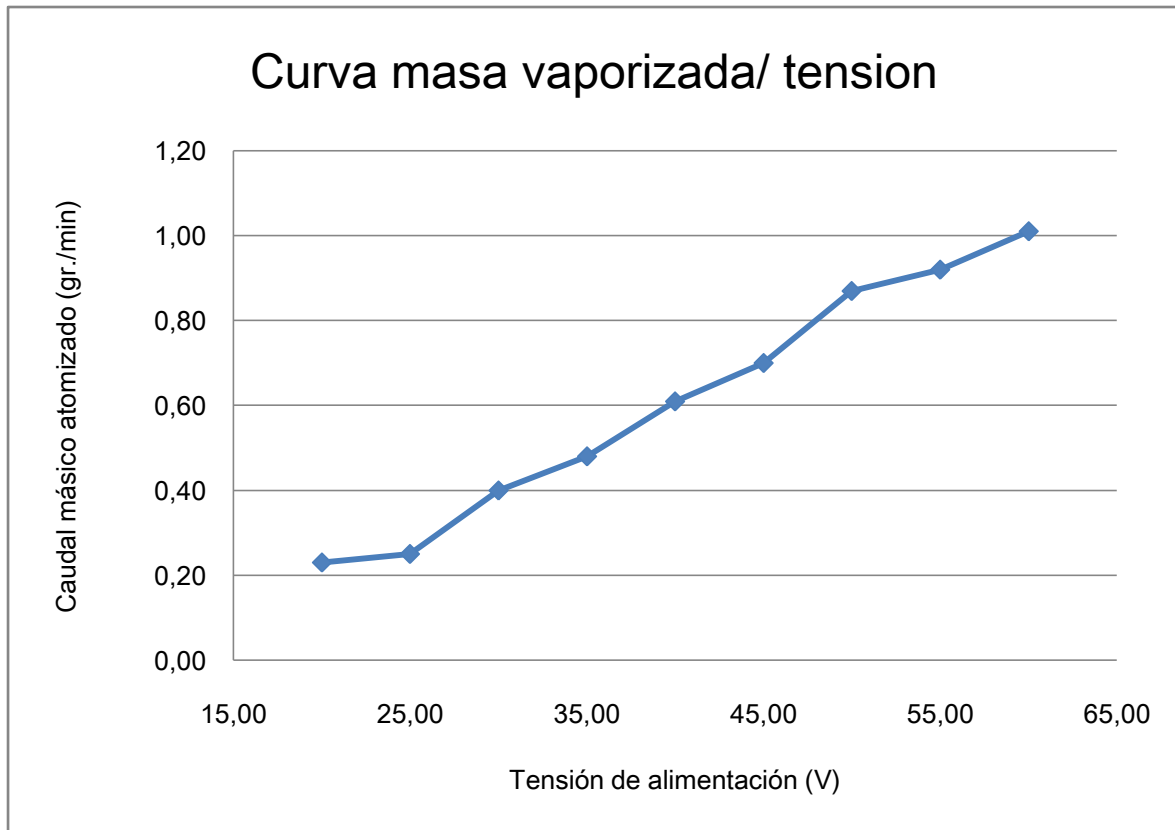


Gráfica 20: Caudal másico en función de la potencia consumida con agua destilada

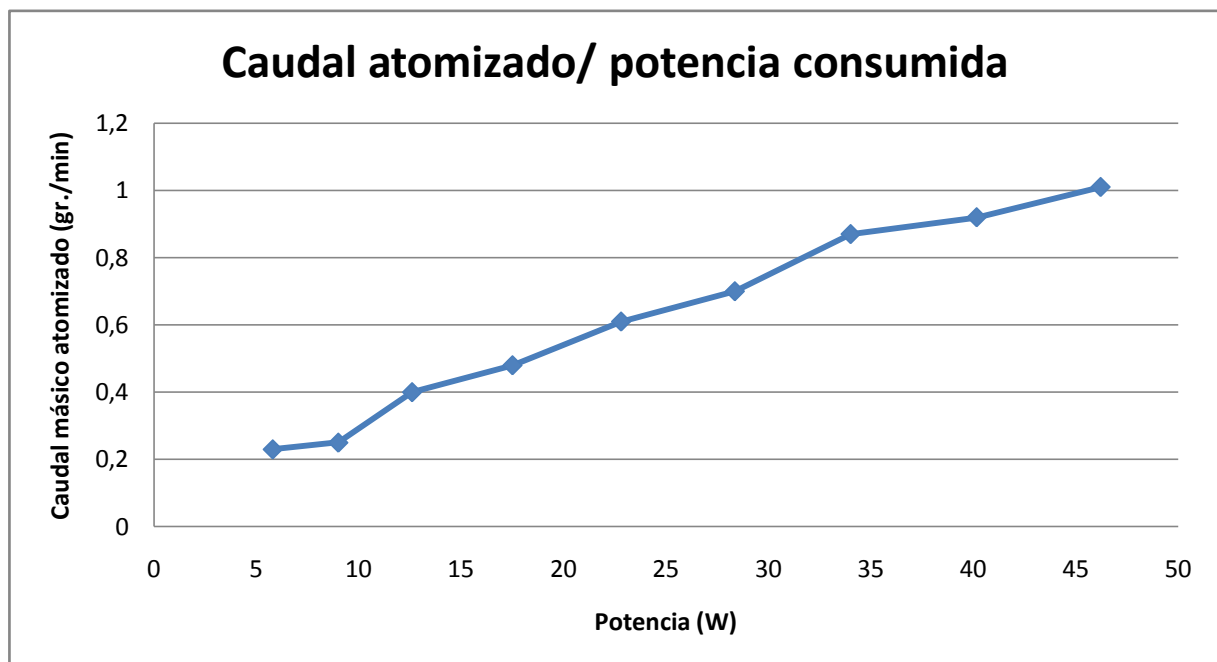
- Medidas con mezcla acuosa al 34,78 en volumen.

Tensión de entrada (V)	Masa atomizada (gr/min)	Corriente de entrada (A)	Potencia media (W)
60,00	1,01	0,77	46,20
55,00	0,92	0,73	40,15
50,00	0,87	0,68	34,00
45,00	0,70	0,63	28,35
40,00	0,61	0,57	22,80
35,00	0,48	0,50	17,50
30,00	0,40	0,42	12,60
25,00	0,25	0,36	9,00
20,00	0,23	0,29	5,80
15,00	-	0,21	3,15
10,00	-	0,15	1,50

Tabla 10: tabla de datos de curva a tensión variable con muestras cada 60 seg. para mezcla acuosa de glicerina al 34,78% en volumen.



Gráfica 21: masa de mezcla de glicerina al 34,78% en vol. atomizada con tensión variable y muestreos cada 60 segundos

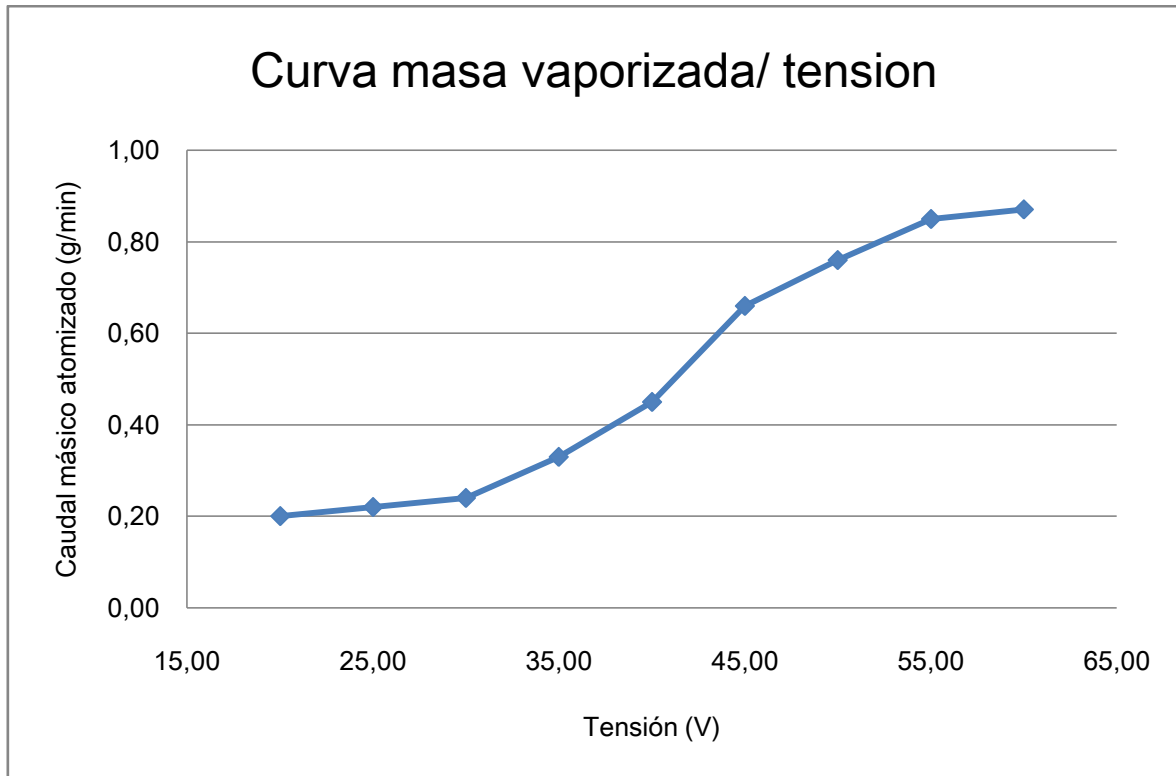


Gráfica 22: Caudal másico en función de la potencia consumida con mezcla acuosa de glicerina al 34,78% en volumen

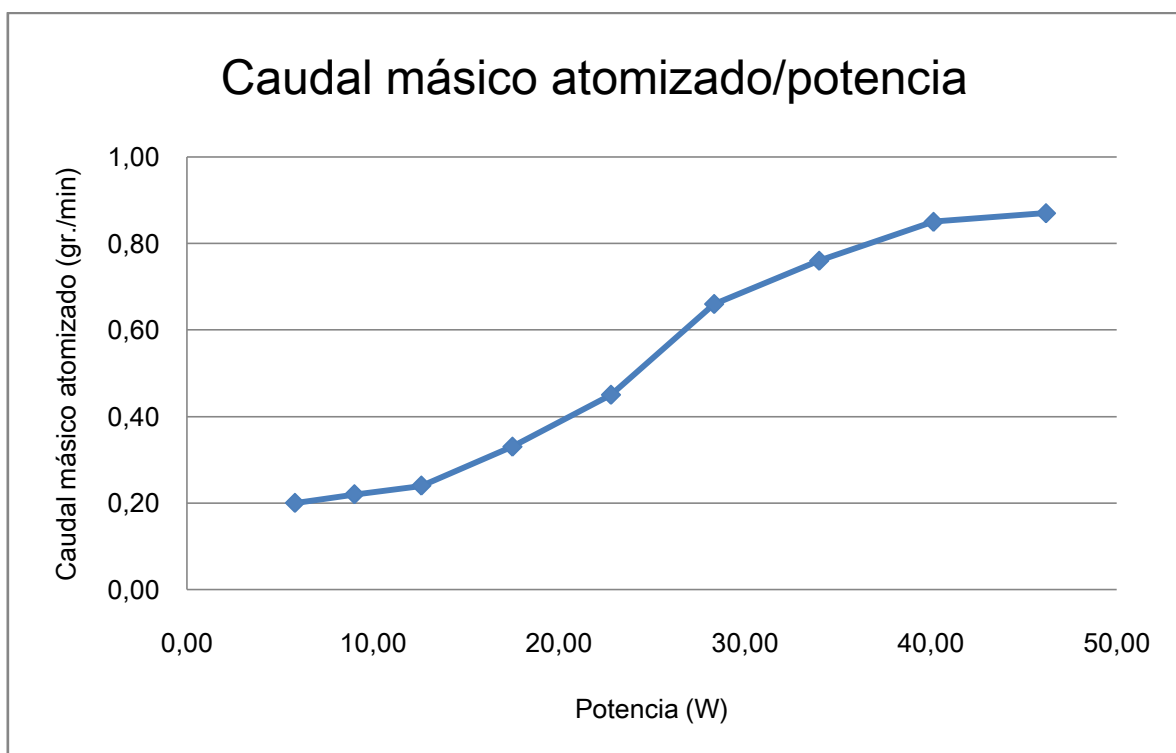
- Medidas con mezcla acuosa al 44,44 % en volumen.

Tensión de entrada (V)	Masa atomizada por minuto(g/min)	Corriente de entrada (A)	Potencia media (W)
60,00	0,87	0,77	46,20
55,00	0,85	0,73	40,15
50,00	0,76	0,68	34,00
45,00	0,66	0,63	28,35
40,00	0,45	0,57	22,80
35,00	0,33	0,50	17,50
30,00	0,24	0,42	12,60
25,00	0,22	0,36	9,00
20,00	0,20	0,29	5,80

Tabla 11: tabla de datos de curva a tensión variable con muestras cada 60 seg. para mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en volumen.



Gráfica 23: masa de mezcla de glicerina al 44,44% en vol. atomizada con tensión variable y muestreos cada 60 segundos



Gráfica 24: Caudal másico en función de la potencia consumida con mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en volumen

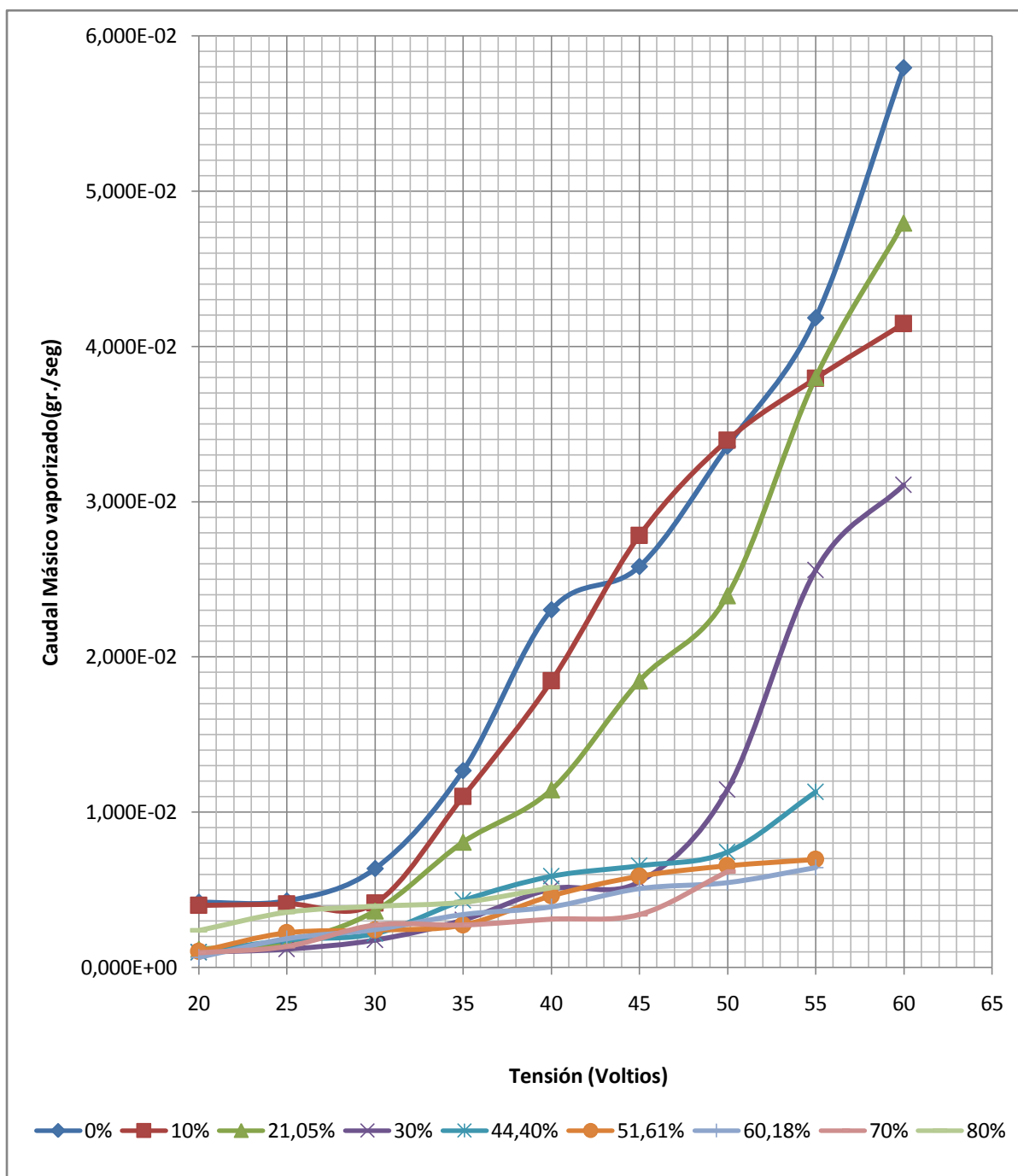
### 8.2.4. Datos de caudal atomizado para distintas concentraciones de glicerina, monitorizando la temperatura.

- Datos resumen

		Porcentaje de glicerina en la mezcla (glicerina/mezcla)								
Tensiones		0%	10%	21,05%	30%	44,40%	51,61%	60,18%	70%	80%
	20	4,212E-03	4,001E-03	1,191E-03	9,651E-04	9,651E-04	1,033E-03	6,662E-04	9,601E-04	2,377E-03
	25	4,304E-03	4,091E-03	1,647E-03	1,189E-03	1,763E-03	2,224E-03	1,866E-03	1,369E-03	3,553E-03
	30	6,365E-03	4,130E-03	3,631E-03	1,763E-03	2,184E-03	2,403E-03	2,440E-03	2,742E-03	3,937E-03
	35	1,269E-02	1,102E-02	8,063E-03	3,050E-03	4,317E-03	2,724E-03	3,408E-03	2,746E-03	4,206E-03
	40	2,304E-02	1,846E-02	1,146E-02	5,062E-03	5,871E-03	4,621E-03	3,896E-03	3,107E-03	5,137E-03
	45	2,582E-02	2,781E-02	1,847E-02	5,514E-03	6,558E-03	5,886E-03	5,076E-03	3,412E-03	-
	50	3,358E-02	3,395E-02	2,393E-02	1,146E-02	7,428E-03	6,537E-03	5,468E-03	6,163E-03	-
	55	4,185E-02	3,793E-02	3,799E-02	2,557E-02	1,131E-02	6,974E-03	6,424E-03	-	-
	60	5,793E-02	4,147E-02	4,794E-02	3,107E-02	-	-	-	-	-

Tabla 12: Datos resumen de caudales medios atomizados. Caudal en gr./seg.

### Curvas resumen de caudal másico vaporizado para distintas concentraciones de glicerina



Gráfica 25: Curvas resumen del caudal másico vaporizado (valores medios) para cada concentración de glicerina a tensión de alimentación variable



- Datos con agua destilada**

60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,05	1,23	0,65	28,8	30,64	1,05	0,59	31,2	30,41	0,98	0,53	30,4
60,61	2,83	0,66	29,3	60,10	2,28	0,60	31,4	60,10	1,91	0,54	31,0
90,32	4,42	0,67	30,1	90,26	3,55	0,61	31,6	89,53	2,92	0,54	31,4
120,34	6,25	0,68	31,0	120,10	4,79	0,62	32,0	120,11	3,93	0,55	31,8
154,99	8,18	0,68	31,2	150,30	6,08	0,62	32,5	150,61	4,95	0,55	32,1
180,37	9,72	0,69	32,3	180,38	7,28	0,62	32,7	180,21	5,91	0,55	32,4
217,06	11,81	0,69	33,1	210,10	8,61	0,62	33,0	210,35	6,98	0,55	32,5
240,36	13,30	0,69	33,6	241,04	9,84	0,62	33,3	240,60	7,95	0,55	32,7
270,81	15,00	0,69	33,7	271,89	11,10	0,62	33,5	270,01	9,03	0,55	32,8
300,26	16,81	0,69	34,1	300,31	12,33	0,63	33,9	300,30	10,04	0,55	33,0

45 V				40 V				35 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,43	0,86	0,47	29,6	31,12	0,71	0,40	31,7	30,30	0,60	0,35	30,80
60,19	1,72	0,47	29,7	50,43	1,15	0,41	31,9	59,05	1,02	0,35	30,90
90,19	2,50	0,47	30,1	89,87	2,12	0,41	32,0	90,12	1,43	0,36	31,20
120,10	3,33	0,48	30,6	120,01	2,72	0,41	32,1	120,10	1,81	0,36	31,60
150,33	4,08	0,48	31,0	150,69	3,39	0,42	32,3	155,45	2,18	0,36	32,00
179,94	4,86	0,48	31,2	179,97	4,00	0,42	32,6	180,55	2,53	0,36	32,30
210,13	5,65	0,48	31,7	210,43	4,62	0,42	33,0	210,41	2,92	0,36	32,60
240,20	6,39	0,48	32,2	240,09	5,26	0,42	33,2	246,90	3,35	0,36	33,00
270,11	7,11	0,48	32,5	270,47	5,87	0,42	33,4	270,16	3,67	0,36	33,10
300,08	7,82	0,49	33,0	289,11	6,53	0,42	33,8	300,07	3,99	0,36	33,40

30 V				25 V				20 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
31,04	0,23	0,30	30,90	35,28	0,16	0,23	28,70	30,14	0,07	0,19	31,10
59,92	0,45	0,30	31,20	59,92	0,31	0,23	28,70	61,02	0,22	0,19	31,10
90,38	0,61	0,30	31,40	90,15	0,45	0,23	28,80	90,03	0,36	0,19	30,20
119,69	0,83	0,30	31,40	120,29	0,56	0,23	28,90	120,23	0,47	0,19	30,20
150,08	1,04	0,30	31,70	149,45	0,69	0,24	29,20	151,23	0,60	0,19	30,20
180,40	1,20	0,30	31,90	180,28	0,78	0,24	29,40	180,10	0,69	0,19	30,20
210,15	1,38	0,30	32,10	212,58	0,95	0,24	29,50	210,45	0,86	0,19	30,20
240,09	1,57	0,30	32,30	243,74	1,09	0,24	29,70	242,05	1,00	0,19	30,20
270,31	1,78	0,30	32,50	270,46	1,19	0,24	30,00	270,54	1,10	0,19	30,20
300,08	1,94	0,30	32,70	301,93	1,30	0,24	30,10	300,06	1,21	0,19	30,20

Tabla 13: Caudales atomizados con agua destilada

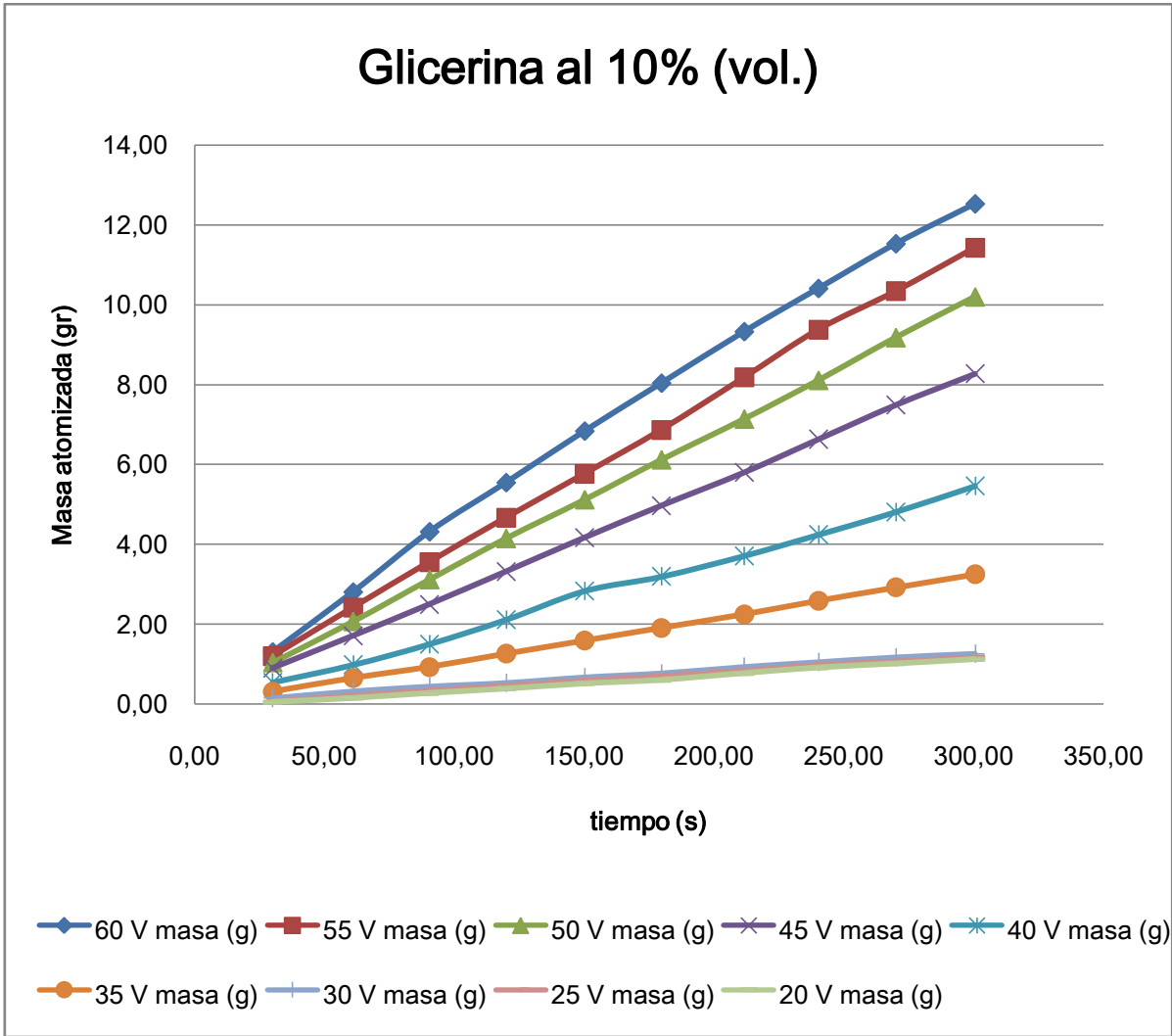
- Mezcla acuosa de glicerina al 10% en volumen

60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
29,99	1,31	0,67	29,5	30,64	1,20	0,60	30,1	30,24	1,04	0,53	28,6
60,98	2,81	0,68	30,1	60,19	2,42	0,61	30,4	60,24	2,07	0,54	28,9
90,41	4,32	0,69	30,6	90,51	3,56	0,62	30,9	90,29	3,12	0,55	29,3
119,90	5,55	0,69	31,1	119,31	4,67	0,62	31,0	120,62	4,15	0,55	29,5
150,16	6,84	0,69	31,4	150,11	5,77	0,62	31,2	150,12	5,12	0,55	29,9
179,73	8,04	0,69	31,8	180,14	6,87	0,62	31,4	180,23	6,12	0,55	30,4
211,61	9,33	0,69	32,0	210,18	8,18	0,63	31,7	211,16	7,14	0,55	30,8
240,19	10,41	0,69	32,2	240,28	9,38	0,63	31,9	240,06	8,11	0,56	31,0
270,00	11,53	0,69	32,5	269,58	10,34	0,63	32,0	270,34	9,18	0,56	31,3
300,52	12,53	0,69	32,8	300,42	11,43	0,63	32,2	300,01	10,20	0,56	31,4

45 V				40 V				35 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,28	0,90	0,47	30,7	35,48	0,54	0,41	28,5	33,83	0,31	0,35	31,00
60,23	1,71	0,48	30,8	60,15	0,98	0,41	29,0	63,40	0,65	0,36	31,40
90,33	2,50	0,49	31,3	90,55	1,50	0,42	29,5	90,56	0,93	0,36	31,50
120,19	3,32	0,49	31,6	122,90	2,11	0,42	29,7	120,17	1,26	0,36	31,50
150,30	4,17	0,49	31,7	163,46	2,83	0,42	30,3	150,29	1,59	0,36	31,80
180,12	4,97	0,49	31,9	182,96	3,19	0,42	30,3	180,29	1,91	0,36	31,80
210,15	5,80	0,50	32,2	211,10	3,71	0,42	30,7	211,35	2,25	0,36	32,00
240,06	6,63	0,50	32,5	240,18	4,24	0,42	30,9	240,28	2,59	0,36	32,10
279,15	7,49	0,50	32,7	270,20	4,81	0,43	31,0	269,55	2,92	0,36	32,20
300,20	8,27	0,50	32,8	301,96	5,46	0,43	31,6	300,57	3,25	0,36	32,40

30 V				25 V				20 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
31,21	0,15	0,24	31,10	31,05	0,07	0,24	31,10	31,63	0,05	0,19	31,00
60,20	0,32	0,24	31,20	60,12	0,21	0,24	31,20	60,37	0,15	0,19	31,00
89,82	0,44	0,24	31,20	90,30	0,34	0,24	31,20	90,26	0,28	0,19	31,00
120,15	0,53	0,24	31,20	120,35	0,46	0,25	31,20	120,54	0,39	0,19	31,20
150,47	0,67	0,24	31,30	150,23	0,59	0,25	31,30	150,25	0,52	0,19	31,20
180,24	0,77	0,24	31,50	180,01	0,70	0,25	31,50	181,67	0,61	0,19	31,30
210,50	0,93	0,24	31,60	210,26	0,84	0,25	31,60	210,23	0,78	0,19	31,30
240,15	1,05	0,24	31,80	240,18	0,98	0,25	31,80	240,28	0,92	0,19	31,30
270,10	1,17	0,25	31,90	270,13	1,07	0,25	31,90	270,16	1,02	0,19	31,30
300,37	1,26	0,25	32,10	300,00	1,17	0,25	32,10	301,76	1,13	0,19	31,40

Tabla 14: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 10% en volumen



Gráfica 26: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 10% en vol.

Tensión (V)	60 V	55 V	50 V	45 V	40 V	35 V	30 V	25 V	20 V
Caudal medio (gr./seg.)	0,041469	0,037928	0,033954	0,027806	0,018463	0,011021	0,00413	0,004091	0,004001

Tabla 15: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 10% en vol.

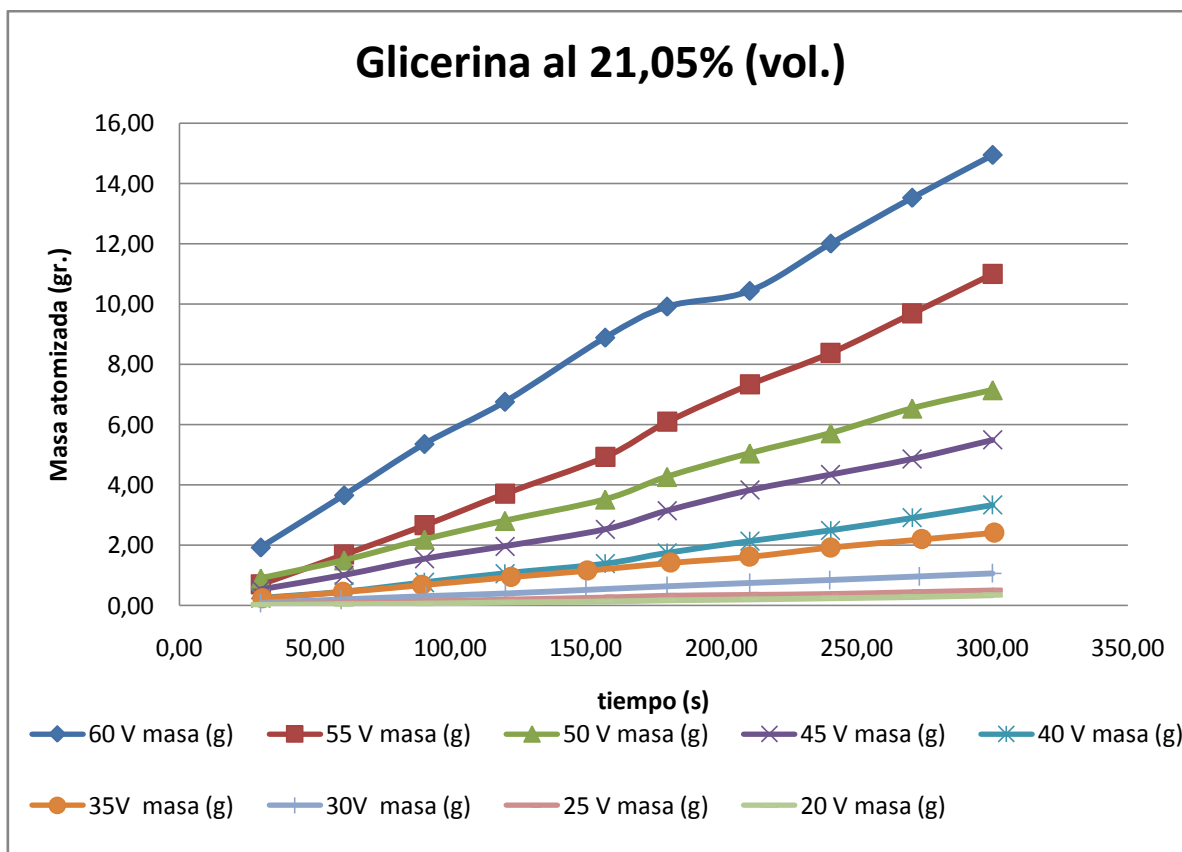
- Mezcla acuosa de glicerina al 21,05% en volumen

60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,03	1,92	0,67	33,3	30,12	0,69	0,60	30,2	38,07	0,89	0,53	29,7
60,79	3,65	0,70	33,5	60,28	1,68	0,61	30,4	60,39	1,49	0,55	29,9
90,42	5,35	0,71	33,6	90,02	2,65	0,62	31,4	90,47	2,18	0,56	30,4
120,10	6,75	0,72	33,7	120,20	3,70	0,63	32,0	120,13	2,80	0,56	30,7
157,10	8,88	0,72	34,0	151,03	4,92	0,64	32,8	150,25	3,51	0,56	31,4
179,93	9,91	0,72	34,1	181,79	6,08	0,64	33,0	180,31	4,26	0,56	32,0
210,43	10,43	0,72	34,4	214,29	7,32	0,64	33,6	211,08	5,04	0,57	32,4
240,32	12,00	0,72	34,7	240,18	8,37	0,64	34,1	240,43	5,71	0,57	32,8
270,37	13,52	0,72	35,0	270,37	9,68	0,64	34,5	270,34	6,53	0,57	33,3
300,06	14,94	0,72	35,5	301,33	10,99	0,64	34,6	300,00	7,14	0,57	33,8

45 V				40 V				35 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,72	0,52	0,49	30,0	30,08	0,24	0,40	30,0	30,58	0,23	0,36	31,80
60,05	1,00	0,49	31,3	60,47	0,45	0,42	30,3	60,34	0,44	0,37	31,80
90,59	1,54	0,49	31,4	92,83	0,76	0,43	30,4	89,43	0,67	0,37	31,90
120,98	1,96	0,50	31,5	120,35	1,06	0,43	30,4	122,31	0,94	0,37	31,90
149,94	2,52	0,50	31,6	150,23	1,38	0,43	31,0	150,48	1,15	0,37	31,90
181,37	3,14	0,50	31,7	180,44	1,74	0,43	31,2	181,24	1,41	0,37	31,90
210,39	3,82	0,50	31,7	210,44	2,13	0,43	31,3	210,20	1,61	0,37	31,90
240,37	4,34	0,51	31,9	240,22	2,49	0,44	31,5	240,17	1,92	0,37	31,90
271,38	4,86	0,51	32,1	271,04	2,90	0,44	31,7	273,94	2,19	0,37	32,00
300,32	5,49	0,52	32,3	300,24	3,33	0,44	32,0	300,63	2,41	0,37	32,10

30 V				25 V				20 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,08	0,08	0,29	31,10	30,94	0,05	0,24	31,00	30,40	0,02	0,19	30,10
59,76	0,19	0,30	31,20	60,16	0,08	0,24	31,00	60,07	0,04	0,19	30,10
90,93	0,30	0,31	31,20	90,66	0,13	0,24	31,00	90,04	0,06	0,19	30,20
120,44	0,39	0,31	31,20	120,57	0,19	0,25	31,20	120,23	0,10	0,19	30,20
150,16	0,51	0,31	31,30	150,67	0,26	0,25	31,20	150,12	0,13	0,19	30,20
180,03	0,63	0,31	31,50	180,45	0,32	0,25	31,20	180,32	0,17	0,19	30,20
210,43	0,74	0,31	31,60	213,99	0,35	0,25	31,20	210,00	0,20	0,19	30,20
240,11	0,84	0,31	31,80	239,33	0,38	0,25	31,20	239,90	0,24	0,19	30,20
273,15	0,96	0,31	31,90	270,32	0,44	0,25	31,20	271,73	0,28	0,19	30,20
300,01	1,06	0,31	32,10	303,76	0,50	0,25	31,30	300,03	0,34	0,19	30,20

Tabla 16: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 21,05% en volumen



Gráfica 27: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 21,05% en vol.

### Caudales medios obtenidos

Tensión (V)	60 V	55 V	50 V	45 V	40 V	35 V	30 V	25 V	20 V
Caudal medio (gr./seg.)	4,794E-02	3,799E-02	2,393E-02	1,847E-02	1,146E-02	8,063E-03	3,631E-03	1,647E-03	1,191E-03

Tabla 17: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 10% en vol.

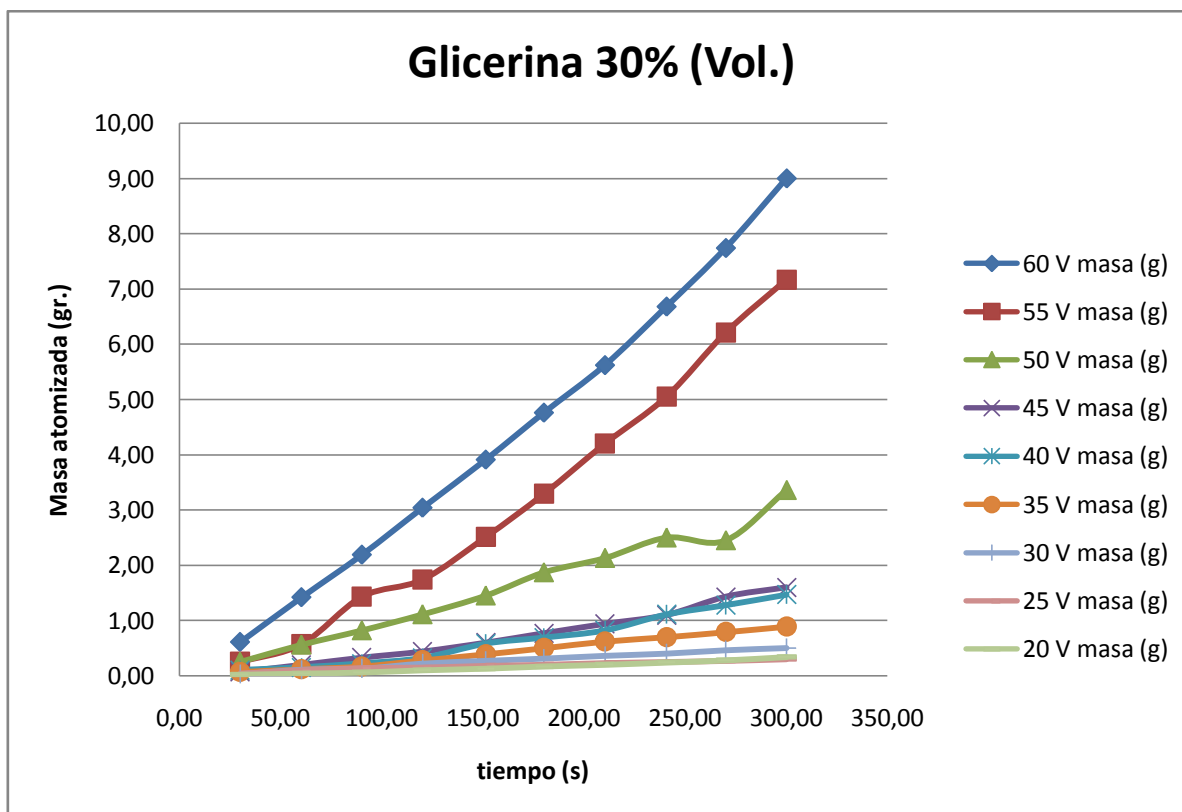
- Mezcla acuosa de glicerina al 30%

60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,05	0,61	0,24	27,30	30,26	0,25	0,60	29,90	32,63	0,25	0,54	31,40
60,39	1,42	0,24	28,20	59,89	0,57	0,60	30,70	60,27	0,56	0,55	31,60
90,26	2,19	0,24	29,00	90,39	1,43	0,61	31,40	90,46	0,82	0,56	33,50
120,24	3,04	0,24	29,80	120,11	1,74	0,63	32,40	120,54	1,11	0,56	34,70
151,49	3,91	0,24	30,80	150,34	2,51	0,63	32,90	150,05	1,45	0,57	35,30
180,24	4,76	0,24	31,70	180,24	3,29	0,63	33,80	181,67	1,87	0,57	36,60
210,44	5,62	0,24	32,80	210,65	4,20	0,64	34,60	210,23	2,13	0,57	36,70
240,88	6,68	0,24	33,40	239,00	5,05	0,64	34,70	240,28	2,50	0,57	37,50
270,20	7,74	0,25	34,20	271,67	6,21	0,64	35,10	270,36	2,45	0,58	38,30
300,26	9,00	0,25	35,00	300,10	7,17	0,65	35,50	301,66	3,36	0,58	38,90

45 V				40 V				35 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,20	0,07	0,48	31,90	30,56	0,10	0,49	33,00	31,43	0,07	0,36	30,30
60,39	0,20	0,48	33,00	60,49	0,15	0,49	33,50	60,22	0,12	0,37	30,40
90,93	0,33	0,49	33,80	91,16	0,22	0,49	33,90	90,01	0,17	0,37	30,60
120,15	0,44	0,50	34,80	120,44	0,32	0,50	34,30	120,18	0,28	0,37	30,80
150,30	0,60	0,50	36,00	151,65	0,58	0,50	34,60	150,48	0,39	0,37	31,00
180,00	0,77	0,50	36,10	180,27	0,69	0,50	34,90	181,58	0,50	0,37	31,30
210,49	0,94	0,50	36,80	210,11	0,82	0,50	35,00	209,69	0,62	0,37	31,50
240,11	1,10	0,51	36,90	240,11	1,11	0,51	35,30	240,95	0,70	0,37	31,80
272,23	1,43	0,51	38,60	270,02	1,28	0,51	35,70	270,17	0,79	0,37	32,10
306,11	1,60	0,51	38,90	300,12	1,47	0,52	36,10	300,33	0,89	0,37	32,40

30 V				25 V				20 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,43	0,03	0,30	30,30	31,51	0,04	0,24	28,20	30,40	0,02	0,19	30,10
60,02	0,11	0,30	30,30	60,41	0,10	0,24	28,20	60,07	0,04	0,19	30,10
91,90	0,13	0,30	30,40	94,11	0,14	0,24	28,30	90,04	0,06	0,19	30,20
120,18	0,22	0,31	30,60	124,28	0,15	0,24	28,30	120,23	0,10	0,19	30,20
150,48	0,27	0,31	30,70	154,24	0,18	0,24	28,50	150,12	0,13	0,19	30,20
181,58	0,31	0,31	30,90	180,70	0,20	0,24	28,70	180,38	0,17	0,19	30,20
210,69	0,36	0,31	31,10	212,13	0,23	0,24	29,00	210,80	0,20	0,19	30,20
240,95	0,40	0,31	31,40	241,14	0,25	0,24	29,10	239,90	0,24	0,19	30,20
270,17	0,46	0,31	31,60	270,27	0,27	0,25	29,20	271,53	0,28	0,19	30,20
300,33	0,50	0,31	31,90	300,17	0,30	0,25	29,50	300,30	0,34	0,19	30,20

Tabla 18: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 21,05% en volumen



Gráfica 28: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 30% en vol.

### Caudales medios

Tensión (V)	60 V	55 V	50 V	45 V	40 V	35 V	30 V	25 V	20 V
Caudal medio (gr./seg.)	3,107E-02	2,557E-02	1,146E-02	5,514E-03	5,062E-03	3,050E-03	1,763E-03	9,651E-04	1,189E-03

Tabla 19: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 30% en vol.

- Mezcla acuosa de glicerina al 44,44%

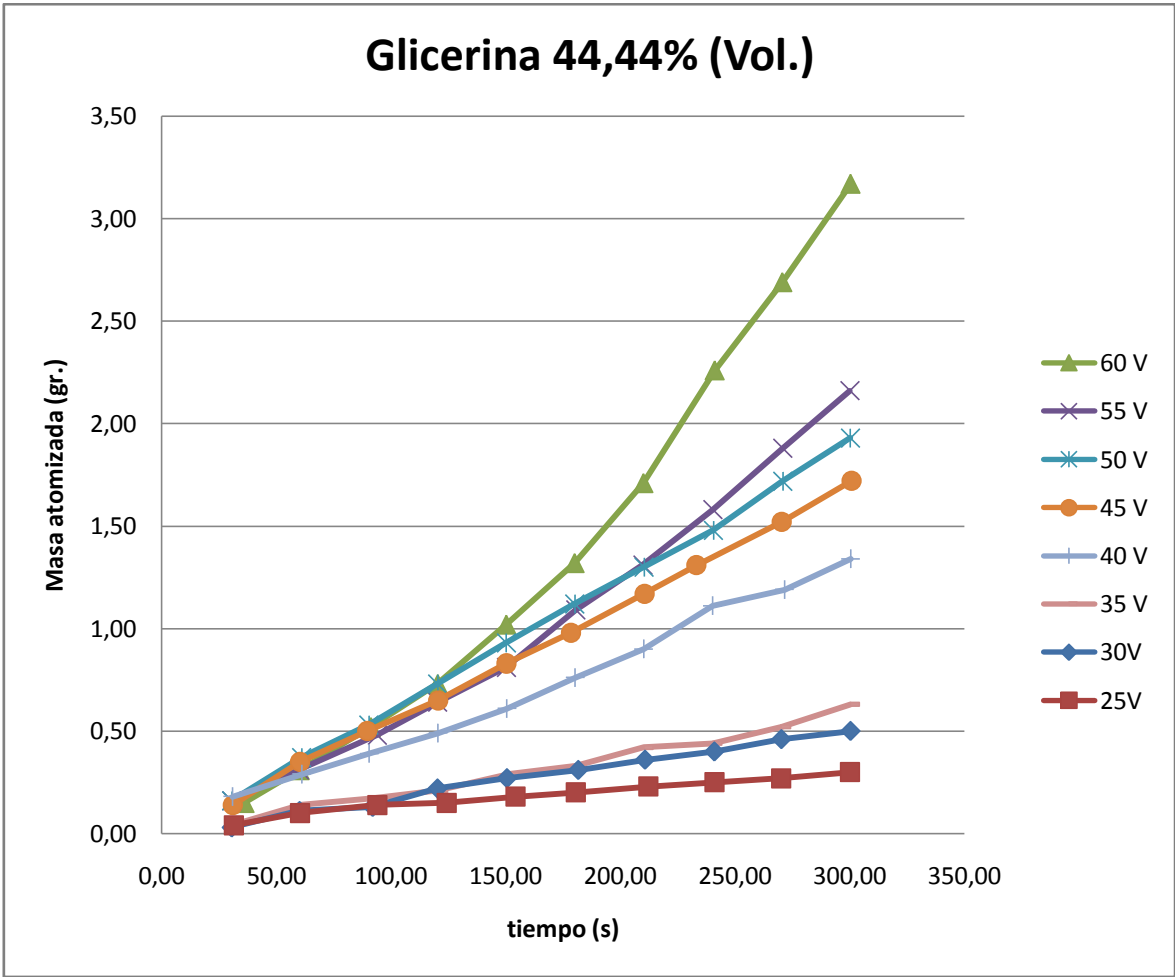
60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
35,97	0,15	0,68	30,10	30,42	0,16	0,62	35,40	30,43	0,16	0,56	31,50
60,02	0,31	0,69	31,20	60,00	0,31	0,62	36,00	60,94	0,37	0,57	32,00
91,11	0,52	0,70	32,30	93,87	0,48	0,63	36,80	90,20	0,53	0,57	32,70
120,24	0,73	0,71	33,30	120,24	0,64	0,64	37,70	120,23	0,73	0,57	33,50
150,17	1,02	0,72	34,50	150,12	0,81	0,64	38,50	150,15	0,93	0,57	34,10
179,96	1,32	0,72	35,60	180,42	1,09	0,64	39,10	180,08	1,12	0,58	34,40
209,98	1,71	0,72	36,10	209,80	1,31	0,64	39,70	210,21	1,30	0,58	34,90
241,06	2,26	0,72	37,00	240,28	1,58	0,64	40,10	240,52	1,48	0,58	35,60
270,57	2,69	0,72	37,30	270,58	1,88	0,64	40,80	270,77	1,72	0,58	36,00
300,32	3,17	0,72	37,80	300,00	2,16	0,64	41,00	300,20	1,93	0,58	36,20

45 V				40 V				35 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,99	0,14	0,49	31,90	30,92	0,18	0,42	33,00	30,56	0,04	0,36	30,70
60,26	0,35	0,49	33,00	61,03	0,29	0,43	33,50	60,49	0,14	0,36	30,80
89,48	0,50	0,49	33,80	90,40	0,39	0,43	33,90	91,16	0,17	0,37	30,90
120,42	0,65	0,50	34,80	120,51	0,49	0,44	34,30	120,44	0,21	0,37	31,30
150,16	0,83	0,50	36,00	150,50	0,61	0,44	34,60	151,65	0,29	0,37	31,60
178,48	0,98	0,50	36,10	180,28	0,76	0,44	34,90	180,27	0,33	0,37	32,00
210,39	1,17	0,50	36,80	210,17	0,90	0,44	35,00	210,11	0,42	0,37	32,30
233,12	1,31	0,51	36,90	240,16	1,11	0,45	35,30	240,11	0,44	0,37	32,50
270,17	1,52	0,51	38,60	271,59	1,19	0,45	35,70	270,02	0,52	0,38	32,70
300,69	1,72	0,52	38,90	300,39	1,34	0,45	35,70	300,12	0,63	0,38	32,90

30 V				25 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,43	0,03	0,30	30,30	31,51	0,04	0,24	28,20
60,02	0,11	0,30	30,30	60,41	0,10	0,24	28,20
91,90	0,13	0,30	30,40	94,11	0,14	0,24	28,30
120,18	0,22	0,31	30,60	124,28	0,15	0,24	28,30
150,48	0,27	0,31	30,70	154,24	0,18	0,24	28,50
181,58	0,31	0,31	30,90	180,70	0,20	0,24	28,70
210,69	0,36	0,31	31,10	212,13	0,23	0,24	29,00
240,95	0,40	0,31	31,40	241,14	0,25	0,24	29,10
270,17	0,46	0,31	31,60	270,27	0,27	0,25	29,20
300,33	0,50	0,31	31,90	300,17	0,30	0,25	29,50

Tabla 20: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en vol.





Gráfica 29: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en vol.

Caudal medio

Tensión (V)	60 V	55 V	50 V	45 V	40 V	35 V	30 V	25 V
Caudal medio (gr./seg.)	1,131E-02	7,428E-03	6,558E-03	5,871E-03	4,317E-03	2,184E-03	1,763E-03	9,651E-04

Tabla 21: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en vol.

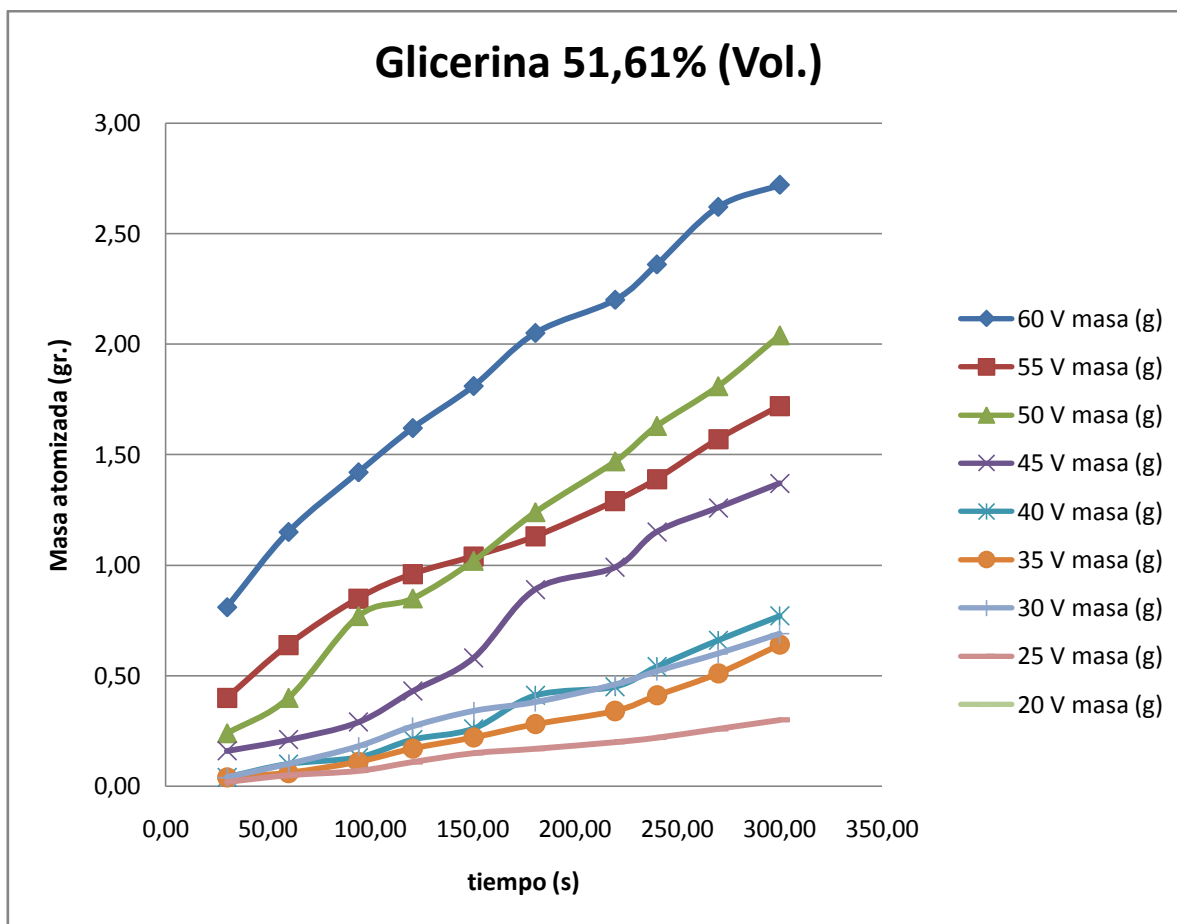
- Mezcla acuosa de glicerina al 51,61% en volumen

60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,00	0,81	0,54	30,10	30,52	0,40	0,50	32,80	30,03	0,24	0,56	34,70
60,00	1,15	0,55	30,50	60,23	0,64	0,50	33,50	60,10	0,40	0,57	34,90
94,21	1,42	0,57	31,80	90,08	0,85	0,51	34,20	89,26	0,77	0,57	35,40
120,71	1,62	0,58	31,90	119,34	0,96	0,51	34,80	120,49	0,85	0,58	36,20
150,46	1,81	0,58	32,90	150,28	1,04	0,51	35,90	150,73	1,02	0,58	36,40
180,65	2,05	0,58	33,90	180,27	1,13	0,51	37,00	180,09	1,24	0,58	36,90
219,65	2,20	0,59	34,50	210,52	1,29	0,52	37,60	210,17	1,47	0,58	37,40
240,04	2,36	0,59	36,10	240,00	1,39	0,52	38,40	240,30	1,63	0,59	37,70
270,02	2,62	0,59	36,70	274,40	1,57	0,52	39,40	270,42	1,81	0,59	38,30
300,12	2,72	0,59	38,10	300,12	1,72	0,52	40,70	300,20	2,04	0,59	38,40

45 V				40 V				35 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,39	0,16	0,36	31,60	30,14	0,04	0,34	31,20	31,59	0,04	0,36	31,90
61,25	0,21	0,37	32,20	60,01	0,10	0,34	31,70	60,22	0,06	0,36	32,00
90,12	0,29	0,37	32,40	90,08	0,13	0,35	32,10	90,14	0,11	0,37	32,10
120,41	0,43	0,38	33,30	116,17	0,21	0,35	32,50	120,01	0,17	0,37	32,50
149,69	0,58	0,39	33,50	150,15	0,26	0,35	32,80	150,14	0,22	0,37	32,90
180,15	0,89	0,39	34,10	181,30	0,41	0,35	33,10	180,07	0,28	0,37	33,20
219,97	0,99	0,39	34,60	212,09	0,45	0,35	33,20	210,10	0,34	0,37	33,50
239,56	1,15	0,39	35,10	240,27	0,54	0,36	33,50	240,07	0,41	0,37	33,70
270,36	1,26	0,40	35,60	270,23	0,66	0,36	33,90	270,20	0,51	0,38	33,90
300,37	1,37	0,40	36,10	300,27	0,77	0,36	33,90	300,31	0,64	0,38	34,10

30 V				25 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,20	0,04	0,40	31,90	30,29	0,02	0,34	33,40
60,61	0,10	0,40	32,00	60,27	0,05	0,34	33,40
90,47	0,18	0,40	32,10	90,44	0,07	0,34	33,50
119,92	0,27	0,41	32,50	120,26	0,11	0,34	33,70
151,80	0,34	0,41	32,80	158,13	0,15	0,34	33,80
180,12	0,38	0,41	33,20	180,12	0,17	0,35	34,00
210,21	0,46	0,41	33,50	211,95	0,20	0,35	34,20
240,14	0,52	0,41	33,70	240,18	0,22	0,35	34,50
270,21	0,60	0,41	33,90	270,17	0,26	0,35	34,70
300,32	0,69	0,41	34,10	300,04	0,30	0,35	35,00

Tabla 22: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 51,61% en vol.



Gráfica 30: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 51,61% en vol.

Caudales medios:

Tensión (V)	60 V	55 V	50 V	45 V	40 V	35 V	30 V	25 V
Caudal medio (gr./seg.)	6,974E-03	6,537E-03	4,621E-03	5,886E-03	2,724E-03	2,224E-03	2,403E-03	1,033E-03

Tabla 23: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 51,61% en vol.

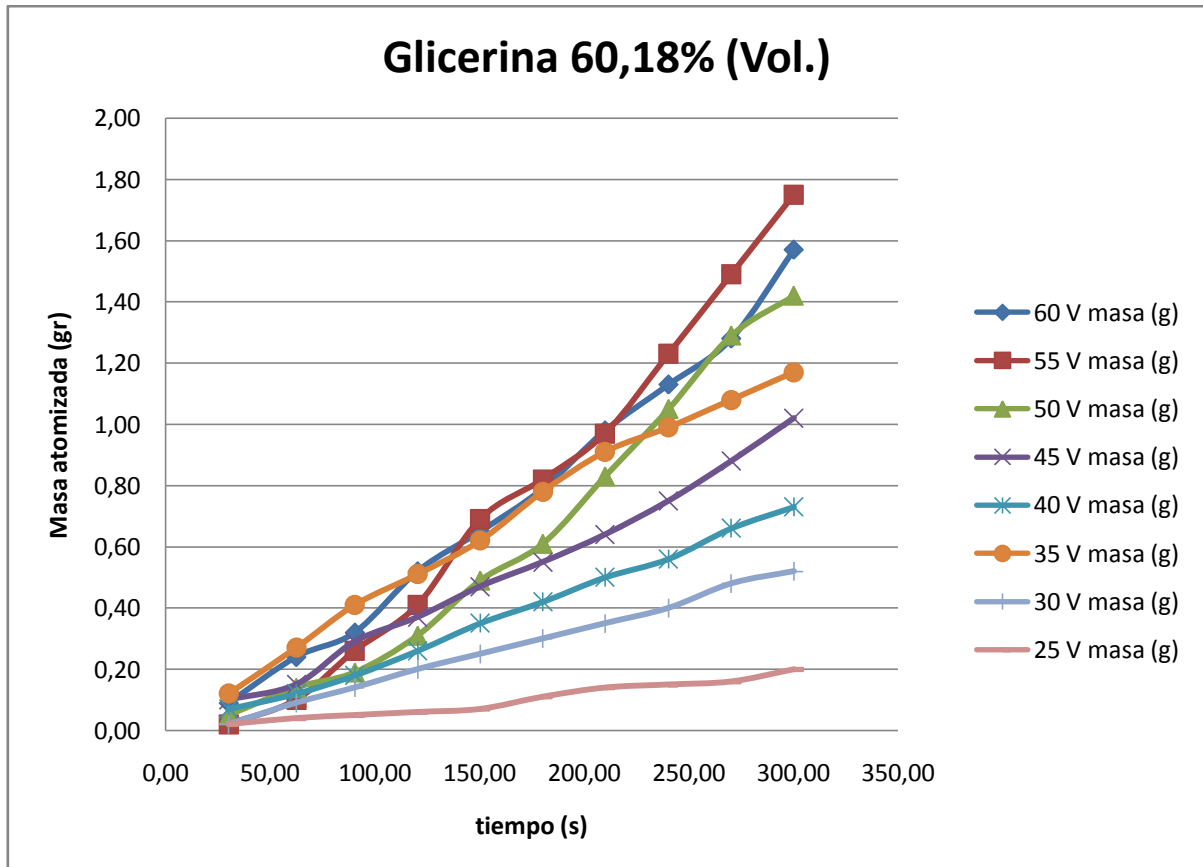
- Mezcla acuosa de glicerina al 60,18 % en volumen

60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,02	0,09	0,54	31,00	31,05	0,02	0,50	32,10	30,32	0,05	0,56	32,40
62,31	0,24	0,55	31,40	60,12	0,10	0,50	32,80	60,27	0,14	0,57	32,60
90,33	0,32	0,57	32,70	90,30	0,26	0,51	33,50	90,03	0,19	0,57	33,10
120,34	0,52	0,58	32,80	120,35	0,41	0,51	34,10	120,23	0,31	0,58	33,90
150,27	0,65	0,58	33,80	150,23	0,69	0,51	35,20	150,34	0,49	0,58	34,10
180,19	0,79	0,58	34,80	180,01	0,82	0,51	36,30	180,27	0,61	0,58	34,60
209,98	0,98	0,59	35,40	210,26	0,97	0,52	36,90	210,20	0,83	0,58	35,10
240,31	1,13	0,59	37,00	240,18	1,23	0,52	37,70	240,20	1,05	0,59	35,40
270,31	1,28	0,59	37,60	270,13	1,49	0,52	38,70	270,05	1,29	0,59	36,00
300,20	1,57	0,59	39,00	300,00	1,75	0,52	40,00	300,16	1,42	0,59	36,10

45 V				40 V				35 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,35	0,10	0,36	32,70	30,00	0,07	0,54	32,40	31,39	0,12	0,47	33,10
60,27	0,15	0,37	33,30	60,34	0,12	0,55	32,90	60,48	0,27	0,48	33,20
90,31	0,29	0,37	33,50	90,60	0,18	0,55	33,30	90,19	0,41	0,48	33,30
120,45	0,37	0,38	34,40	120,37	0,26	0,56	33,70	120,31	0,51	0,49	33,70
150,27	0,47	0,39	34,60	150,65	0,35	0,56	34,00	150,15	0,62	0,49	34,00
180,23	0,55	0,39	35,20	180,13	0,42	0,56	34,30	180,23	0,78	0,49	34,40
210,27	0,64	0,39	35,70	210,20	0,50	0,56	34,40	210,10	0,91	0,49	34,70
239,01	0,75	0,39	36,20	240,31	0,56	0,56	34,70	240,14	0,99	0,49	34,90
270,20	0,88	0,40	36,40	270,38	0,66	0,57	35,10	270,09	1,08	0,49	35,10
300,15	1,02	0,40	36,50	300,60	0,73	0,57	35,10	301,63	1,17	0,49	35,30

30 V				25 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
32,40	0,02	0,41	32,40	30,32	0,02	0,34	33,10
60,37	0,09	0,41	32,50	60,21	0,04	0,34	33,10
89,95	0,14	0,41	32,60	90,09	0,05	0,35	33,20
120,07	0,20	0,41	33,00	120,09	0,06	0,35	33,40
150,11	0,25	0,41	33,30	150,03	0,07	0,35	33,50
180,07	0,30	0,41	33,70	180,22	0,11	0,35	33,70
210,17	0,35	0,41	34,00	210,44	0,14	0,36	33,90
239,60	0,40	0,41	34,20	240,12	0,15	0,36	34,20
270,71	0,48	0,41	34,40	270,09	0,16	0,36	34,40
300,71	0,52	0,41	34,60	300,02	0,20	0,36	34,70

Tabla 24: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 60,18%



Gráfica 31: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 60,18% en vol.

## Caudales medios

Tensión (V)	60 V	55 V	50 V	45 V	40 V	35 V	30 V	25 V
Caudal medio (gr./seg.)	5,468E-03	6,424E-03	5,076E-03	3,408E-03	2,440E-03	3,896E-03	1,866E-03	6,662E-04

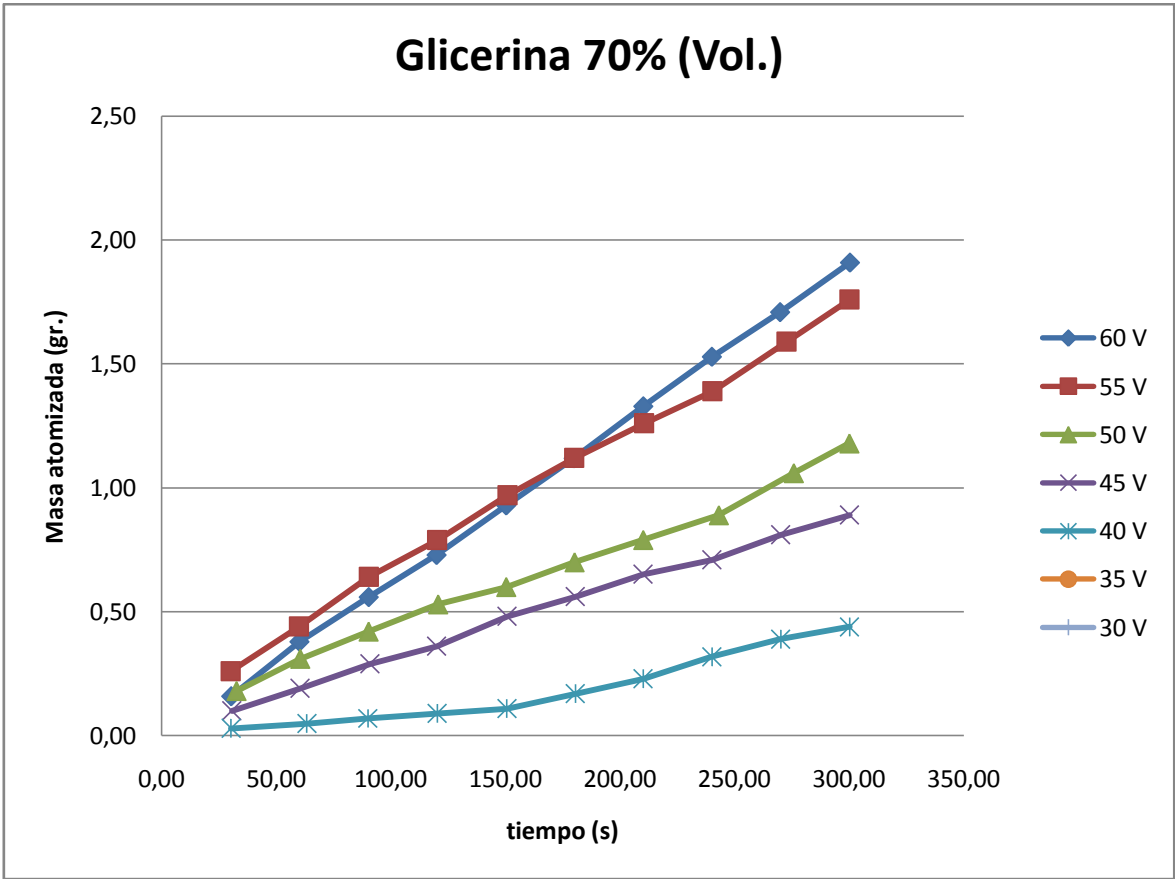
Tabla 25: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 60,18% en vol.

- Mezcla acuosa de glicerina al 70% en volumen.

60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,31	0,16	0,56	34,90	30,00	0,26	0,51	40,80	32,59	0,18	0,43	38,50
60,11	0,38	0,57	35,30	59,92	0,44	0,52	40,30	60,40	0,31	0,45	38,30
90,34	0,56	0,58	35,90	90,37	0,64	0,53	40,10	90,22	0,42	0,46	38,40
119,97	0,73	0,59	36,70	120,23	0,79	0,53	40,30	120,58	0,53	0,46	38,50
150,37	0,93	0,59	37,30	150,80	0,97	0,53	40,60	150,29	0,60	0,46	38,60
179,81	1,12	0,59	38,00	180,07	1,12	0,53	40,70	180,10	0,70	0,46	38,80
210,22	1,33	0,59	38,90	210,55	1,26	0,54	41,00	210,08	0,79	0,47	39,50
240,15	1,53	0,59	39,00	240,35	1,39	0,54	41,10	243,06	0,89	0,47	40,10
269,94	1,71	0,60	40,10	272,79	1,59	0,54	41,20	275,78	1,06	0,47	40,20
300,44	1,91	0,60	40,60	300,23	1,76	0,54	41,60	300,04	1,18	0,47	40,40

45 V				40 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,52	0,10	0,40	39,00	30,26	0,03	0,34	38,90
60,24	0,19	0,40	38,70	63,29	0,05	0,34	39,60
90,93	0,29	0,40	38,80	89,99	0,07	0,35	40,00
120,00	0,36	0,40	39,50	120,21	0,09	0,35	40,30
150,59	0,48	0,41	39,10	150,59	0,11	0,35	40,90
180,59	0,56	0,41	39,80	180,59	0,17	0,35	41,30
210,17	0,65	0,41	40,20	210,17	0,23	0,35	41,70
240,14	0,71	0,41	40,30	240,14	0,32	0,36	42,10
270,25	0,81	0,41	40,50	270,25	0,39	0,36	42,40
300,23	0,89	0,41	40,60	300,23	0,44	0,36	42,60

Tabla 26: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 70% en vol.



Gráfica 32: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 70% en vol.

Caudales medios

Tensión (V)	60 V	55 V	50 V	45 V	40 V
Caudal medio (gr./seg.)	6,477E-03	5,549E-03	3,764E-03	2,779E-03	1,522E-03

Tabla 27: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 70% en vol.

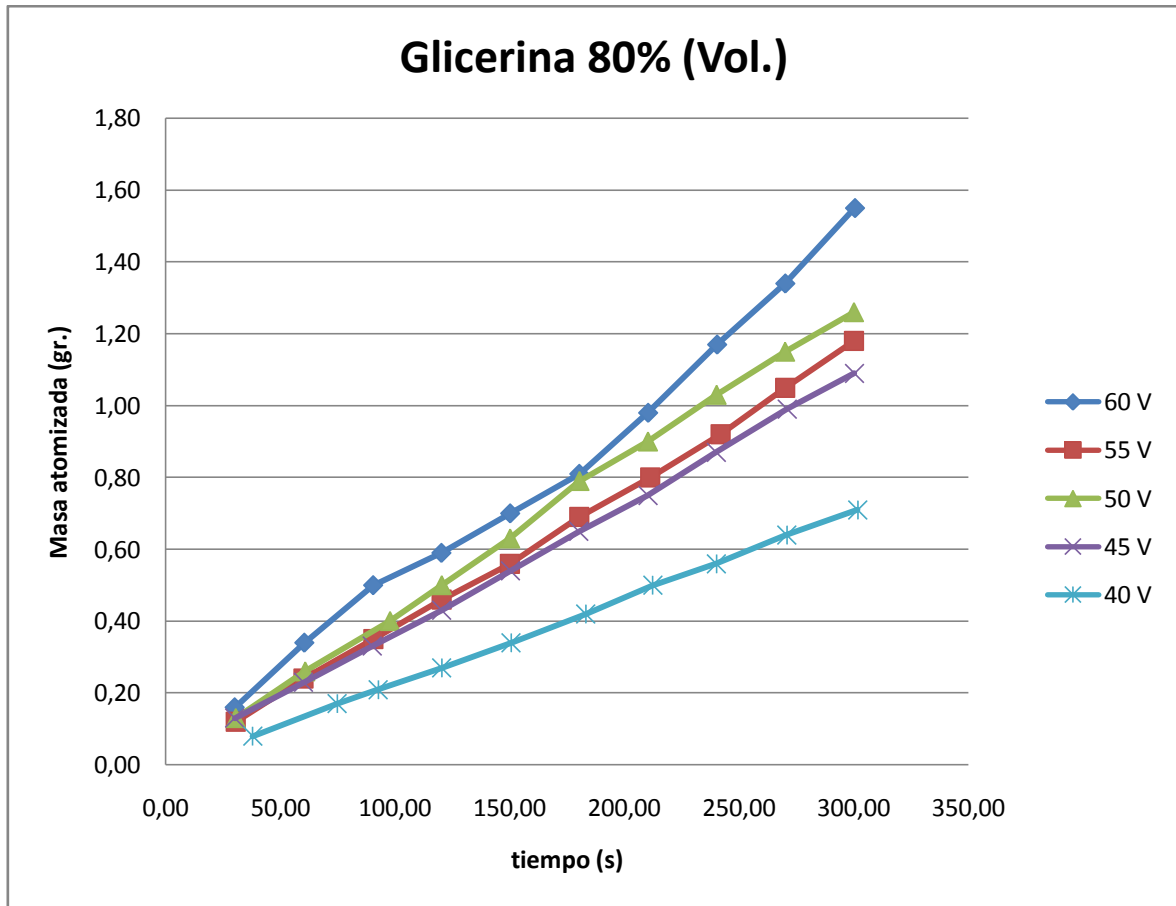
- Mezcla acuosa de glicerina al 80%

60 V				55 V				50 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,31	0,16	0,56	34,90	30,00	0,26	0,51	40,80	32,59	0,18	0,43	38,50
60,11	0,38	0,57	35,30	59,92	0,44	0,52	40,30	60,40	0,31	0,45	38,30
90,34	0,56	0,58	35,90	90,37	0,64	0,53	40,10	90,22	0,42	0,46	38,40
119,97	0,73	0,59	36,70	120,23	0,79	0,53	40,30	120,58	0,53	0,46	38,50
150,37	0,93	0,59	37,30	150,80	0,97	0,53	40,60	150,39	0,62	0,46	38,60
179,81	1,12	0,59	38,00	180,07	1,12	0,53	40,70	180,10	0,70	0,46	38,80
210,32	1,33	0,59	38,90	210,55	1,26	0,54	41,00	210,09	0,79	0,47	39,50
240,15	1,53	0,59	39,50	240,35	1,39	0,54	41,10	243,06	0,89	0,47	40,10
269,94	1,71	0,60	40,10	272,79	1,59	0,54	41,20	275,38	1,06	0,47	40,20
300,44	1,91	0,60	40,60	300,23	1,76	0,54	41,60	300,04	1,18	0,47	40,40

45 V				40 V			
tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)	tiempo (s)	masa (g)	Corriente (A)	Temperatura (°C)
30,57	0,10	0,40	38,70	30,26	0,03	0,34	38,90
60,24	0,19	0,40	38,70	63,29	0,05	0,34	39,60
90,93	0,29	0,40	38,80	89,99	0,07	0,35	40,00
120,00	0,36	0,40	39,50	120,21	0,09	0,35	40,30
150,53	0,48	0,40	39,60	150,59	0,11	0,35	40,90
179,93	0,56	0,41	39,80	180,59	0,17	0,35	41,30
214,93	0,65	0,41	40,20	210,17	0,23	0,36	41,70
242,54	0,71	0,41	40,30	240,14	0,32	0,36	42,10
270,32	0,77	0,41	40,50	270,25	0,39	0,36	42,40
300,11	0,86	0,41	40,60	300,23	0,44	0,36	42,60

Tabla 28: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 80% en vol.





Gráfica 33: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 80%

### Caudales medios

Tensión (V)	60 V	55 V	50 V	45 V	40 V
Caudal medio (gr./seg.)	5,137E-03	3,937E-03	4,206E-03	3,553E-03	2,377E-03

Tabla 29: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 80% en vol.

### 8.3. Tablas y gráficas de los experimentos realizados con el tanque para seis dispositivos

En las medidas con menos dispositivos se ha limitado la cantidad de muestras, debido a la poca sensibilidad de la balanza hay que tener mucho tiempo el equipo funcionando para que la cantidad de masa atomizada sea apreciable.

4 dispositivos		5 dispositivos		6 dispositivos	
Tiempo (segundos)	Masa (gramos)	Tiempo (segundos)	Masa (gramos)	Tiempo (segundos)	Masa (gramos)
0	3020	0,00	3080	0	2760
38	3000	38,00	3060	52	2740
106	2980	89,00	3040	149	2720
161	2960	219,00	3020	200	2700
251	2940	285,00	3000	238	2680
345	2920	360,00	2980	305	2660
420	2900	412,00	2960	409	2640
508	2880	523,00	2940	462	2620
595	2860	570,00	2920	500	2600
627	2840	669,00	2900	570	2580
				608	2560

1 dispositivo		2 dispositivos		3 dispositivos	
Tiempo (segundos)	Masa (gramos)	Tiempo (segundos)	Masa (gramos)	Tiempo (segundos)	Masa (gramos)
0,00	2980	0	2980	0	2980
80,00	2960	102	2960	113	2960
344,00	2940	241	2940	222	2940
714,00	2920	356	2920	281	2920
972,00	2900	530	2900	373	2900
		685	2880	533	2880
				601	2860
				733	2840
				841	2820

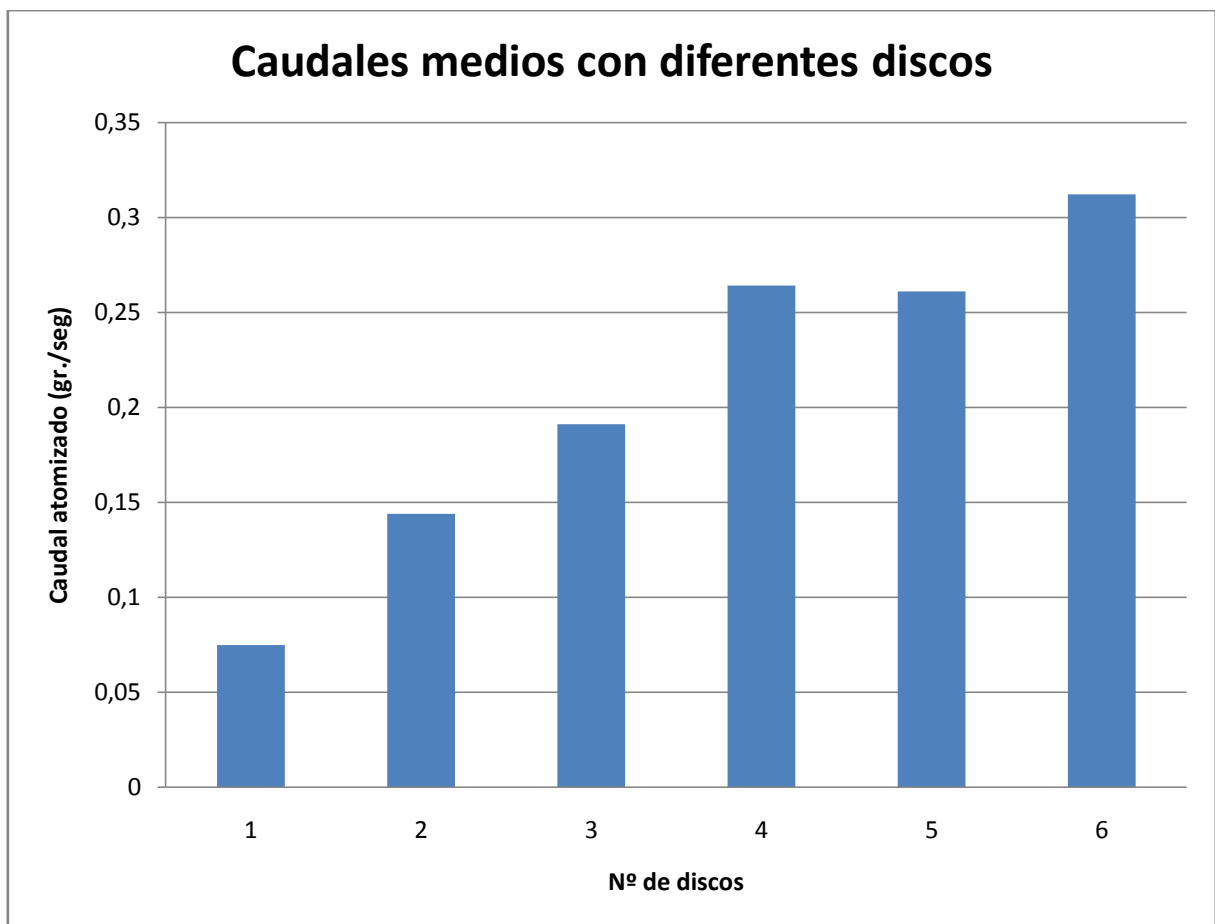
Tabla 30: Datos de caudal vaporizado con tanque para 6 dispositivos

Nº de dispositivos	1	2	3	4	5	6
Caudal medio (gr/seg)	0,075	0,144	0,191	0,264	0,261	0,312

Tabla 31: Caudal medio obtenido con varios dispositivos simultáneamente

Número de discos	1	2	3	4	5	6
Comparación de rendimiento con un disco	1	1,92	2,55	3,52	3,48	4,16

Tabla 32: Tabla comparativa del rendimiento obtenido en comparación con el funcionamiento de un disco



Gráfica 34: Comparación de caudales atomizados por los dispositivos

## 8.4. Curvas de caudal atomizado en función de la viscosidad

Con los datos obtenidos, en los que se ha monitorizado la temperatura en cada instante se puede calcular la viscosidad del fluido en cada instante. Para ello se han obtenido las formulas de recurrencia de las tablas de viscosidad y densidad de mezcla acuosa de glicerina de “DOW chemical company”.

Los valores de las tablas se han calculado para cada tensión y para cada concentración de glicerina. Las unidades utilizadas son las siguientes:

- Viscosidad:  $\mu(\mu)$  en  $[Pa \cdot s]$  o en centiPois  $[cP]$
- Viscosidad dinámica  $\nu(\nu)$  en centiStokes  $[cSt]$
- Caudal atomizado en gramos por segundo  $[gr/s]$

- A 60 voltios

0%			10%			21,05%		
mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q
8,22E-01	8,26E-04	5,24E-02	1,10E+00	1,08E-03	4,84E-02	1,46E+00	1,39E-03	5,62E-02
8,13E-01	8,17E-04	5,35E-02	1,09E+00	1,06E-03	5,13E-02	1,45E+00	1,38E-03	5,74E-02
7,99E-01	8,03E-04	6,10E-02	1,07E+00	1,05E-03	4,17E-02	1,45E+00	1,38E-03	4,72E-02
7,83E-01	7,87E-04	5,57E-02	1,06E+00	1,04E-03	4,26E-02	1,45E+00	1,38E-03	5,76E-02
7,80E-01	7,84E-04	6,07E-02	1,05E+00	1,03E-03	4,06E-02	1,44E+00	1,37E-03	4,51E-02
7,62E-01	7,66E-04	5,70E-02	1,04E+00	1,02E-03	4,05E-02	1,43E+00	1,36E-03	1,70E-02
7,49E-01	7,53E-04	6,39E-02	1,04E+00	1,02E-03	3,78E-02	1,42E+00	1,35E-03	5,25E-02
7,41E-01	7,45E-04	5,58E-02	1,03E+00	1,01E-03	3,76E-02	1,41E+00	1,34E-03	5,06E-02
7,39E-01	7,44E-04	6,15E-02	1,03E+00	1,00E-03	3,28E-02	1,40E+00	1,33E-03	4,78E-02
7,33E-01	7,38E-04	5,79E-02	1,02E+00	9,98E-04	4,15E-02	1,38E+00	1,32E-03	4,79E-02

30%			44,4%			51,61%		
mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q
2,43E+00	2,26E-03	2,67E-02	4,25E+00	3,83E-03	6,65E-03	6,16E+00	5,48E-03	1,13E-02
2,37E+00	2,20E-03	2,58E-02	4,09E+00	3,70E-03	6,75E-03	6,07E+00	5,40E-03	7,89E-03
2,31E+00	2,15E-03	2,84E-02	3,95E+00	3,56E-03	7,21E-03	5,79E+00	5,15E-03	7,55E-03
2,26E+00	2,10E-03	2,78E-02	3,82E+00	3,45E-03	9,69E-03	5,77E+00	5,13E-03	6,39E-03
2,20E+00	2,04E-03	2,96E-02	3,67E+00	3,32E-03	1,01E-02	5,56E+00	4,95E-03	7,95E-03
2,14E+00	1,99E-03	2,85E-02	3,55E+00	3,21E-03	1,30E-02	5,37E+00	4,78E-03	3,85E-03
2,08E+00	1,93E-03	3,48E-02	3,49E+00	3,16E-03	1,77E-02	5,26E+00	4,68E-03	7,85E-03
2,04E+00	1,90E-03	3,62E-02	3,40E+00	3,07E-03	1,46E-02	4,97E+00	4,44E-03	8,67E-03
2,00E+00	1,86E-03	4,19E-02	3,37E+00	3,05E-03	1,61E-02	4,87E+00	4,35E-03	3,32E-03
1,95E+00	1,82E-03	3,11E-02	3,32E+00	3,00E-03	1,13E-02	4,65E+00	4,15E-03	7,20E-03

60,18%			70%			80%		
mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q
9,83E+00	8,61E-03	4,65E-03	1,62E+01	1,40E-02	7,38E-03	2,58E+01	2,19E-02	5,93E-03
9,67E+00	8,47E-03	2,86E-03	1,60E+01	1,37E-02	5,95E-03	2,53E+01	2,15E-02	5,34E-03
9,17E+00	8,03E-03	6,66E-03	1,55E+01	1,34E-02	5,74E-03	2,42E+01	2,06E-02	3,03E-03
9,13E+00	8,00E-03	4,34E-03	1,50E+01	1,29E-02	6,58E-03	2,36E+01	2,01E-02	3,67E-03
8,78E+00	7,69E-03	4,68E-03	1,46E+01	1,26E-02	6,45E-03	2,32E+01	1,98E-02	3,65E-03
8,44E+00	7,40E-03	6,38E-03	1,42E+01	1,22E-02	6,88E-03	2,24E+01	1,90E-02	5,67E-03
8,24E+00	7,23E-03	4,95E-03	1,36E+01	1,18E-02	6,70E-03	2,23E+01	1,90E-02	6,32E-03
7,75E+00	6,80E-03	5,00E-03	1,33E+01	1,15E-02	6,04E-03	2,12E+01	1,81E-02	5,72E-03
7,58E+00	6,65E-03	9,70E-03	1,30E+01	1,12E-02	6,56E-03	2,10E+01	1,79E-02	6,91E-03
7,20E+00	6,32E-03	5,47E-03	1,27E+01	1,10E-02	6,48E-03	2,05E+01	1,74E-02	5,14E-03

Tabla 33: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 60 voltios



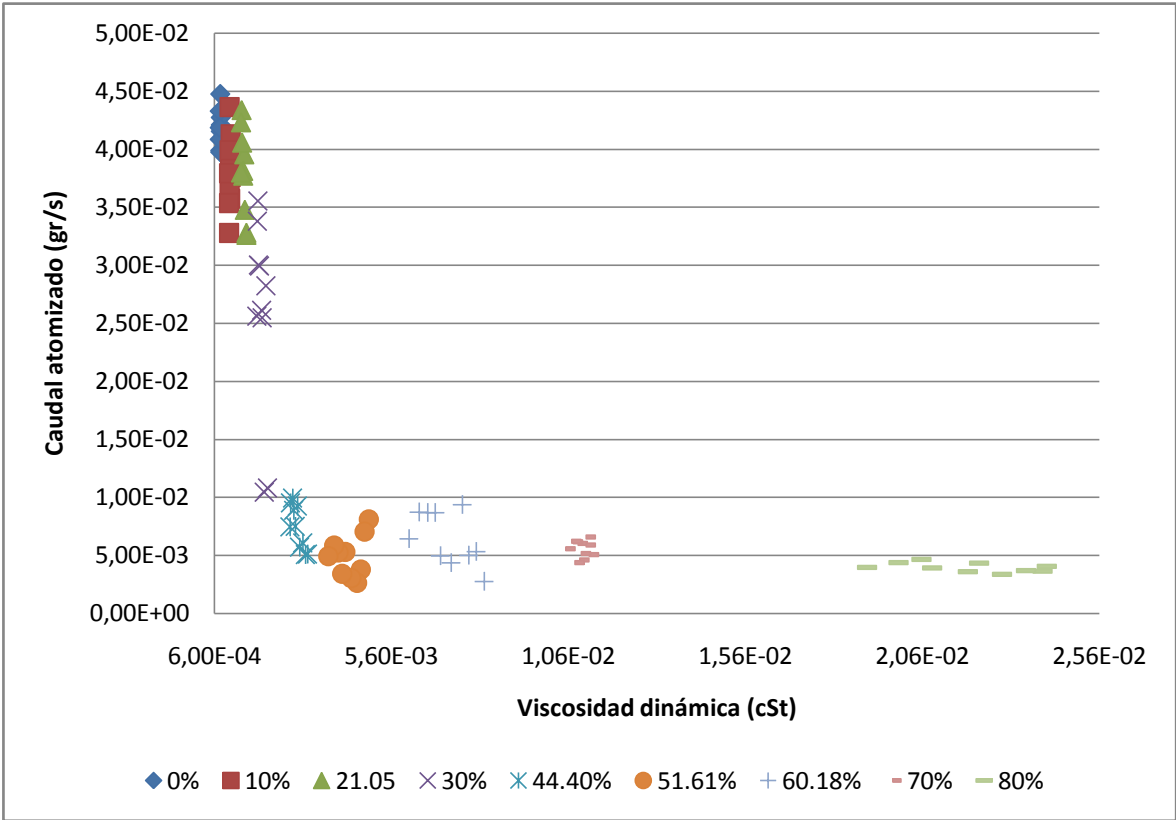
- A 55 voltios

0%			10%			21,05%			30%		
mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q
7,80E-01	7,84E-04	4,18E-02	1,09E+00	1,06E-03	4,13E-02	1,58E+00	1,50E-03	3,28E-02	2,25E+00	2,10E-03	1,08E-02
7,77E-01	7,80E-04	4,21E-02	1,08E+00	1,06E-03	3,76E-02	1,57E+00	1,50E-03	3,26E-02	2,20E+00	2,05E-03	2,82E-02
7,73E-01	7,77E-04	4,16E-02	1,07E+00	1,04E-03	3,85E-02	1,53E+00	1,46E-03	3,48E-02	2,16E+00	2,01E-03	1,04E-02
7,67E-01	7,71E-04	4,27E-02	1,06E+00	1,04E-03	3,57E-02	1,51E+00	1,44E-03	3,96E-02	2,10E+00	1,95E-03	2,55E-02
7,58E-01	7,62E-04	3,99E-02	1,06E+00	1,04E-03	3,66E-02	1,48E+00	1,41E-03	3,77E-02	2,07E+00	1,93E-03	2,61E-02
7,55E-01	7,59E-04	4,48E-02	1,05E+00	1,03E-03	4,36E-02	1,47E+00	1,40E-03	3,82E-02	2,02E+00	1,88E-03	2,99E-02
7,50E-01	7,55E-04	3,98E-02	1,05E+00	1,02E-03	3,99E-02	1,45E+00	1,38E-03	4,06E-02	1,97E+00	1,84E-03	3,00E-02
7,46E-01	7,50E-04	4,08E-02	1,04E+00	1,02E-03	3,28E-02	1,43E+00	1,36E-03	4,34E-02	1,97E+00	1,84E-03	3,55E-02
7,43E-01	7,47E-04	4,33E-02	1,04E+00	1,02E-03	3,53E-02	1,42E+00	1,35E-03	4,23E-02	1,95E+00	1,82E-03	3,38E-02
7,36E-01	7,41E-04	4,19E-02	1,03E+00	1,01E-03	3,79E-02	1,41E+00	1,35E-03	3,80E-02	1,93E+00	1,80E-03	2,56E-02

44,40%			51,61%			60,18%		
mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q
3,57E+00	3,23E-03	5,07E-03	5,58E+00	4,97E-03	8,08E-03	9,40E+00	8,23E-03	2,75E-03
3,50E+00	3,17E-03	5,02E-03	5,45E+00	4,85E-03	7,04E-03	9,13E+00	8,00E-03	5,30E-03
3,42E+00	3,09E-03	6,07E-03	5,31E+00	4,73E-03	3,76E-03	8,88E+00	7,78E-03	4,99E-03
3,33E+00	3,01E-03	5,69E-03	5,20E+00	4,64E-03	2,59E-03	8,67E+00	7,60E-03	9,37E-03
3,25E+00	2,94E-03	9,24E-03	5,01E+00	4,47E-03	3,00E-03	8,30E+00	7,28E-03	4,37E-03
3,19E+00	2,89E-03	7,49E-03	4,82E+00	4,30E-03	5,29E-03	7,96E+00	6,98E-03	4,96E-03
3,13E+00	2,84E-03	8,86E-03	4,73E+00	4,22E-03	3,39E-03	7,78E+00	6,83E-03	8,69E-03
3,09E+00	2,80E-03	9,90E-03	4,61E+00	4,11E-03	5,23E-03	7,55E+00	6,63E-03	8,68E-03
3,03E+00	2,75E-03	9,52E-03	4,46E+00	3,98E-03	5,83E-03	7,28E+00	6,39E-03	8,70E-03
3,01E+00	2,73E-03	7,43E-03	4,28E+00	3,82E-03	4,91E-03	6,94E+00	6,10E-03	6,42E-03

70%			80%		
mu	nu	Q	mu	nu	Q
1,26E+01	1,09E-02	6,02E-03	2,84E+01	2,41E-02	4,05E-03
1,28E+01	1,11E-02	6,57E-03	2,83E+01	2,40E-02	3,64E-03
1,30E+01	1,12E-02	5,02E-03	2,77E+01	2,35E-02	3,68E-03
1,28E+01	1,11E-02	5,89E-03	2,69E+01	2,29E-02	3,35E-03
1,27E+01	1,10E-02	5,12E-03	2,61E+01	2,22E-02	4,29E-03
1,26E+01	1,09E-02	4,59E-03	2,58E+01	2,19E-02	3,58E-03
1,25E+01	1,08E-02	4,36E-03	2,46E+01	2,09E-02	3,88E-03
1,24E+01	1,07E-02	6,17E-03	2,42E+01	2,06E-02	4,64E-03
1,24E+01	1,07E-02	6,20E-03	2,34E+01	1,99E-02	4,33E-03
1,22E+01	1,05E-02	5,55E-03	2,24E+01	1,90E-02	3,94E-03

Tabla 34: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 55 voltios



Gráfica 36: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 55 voltios



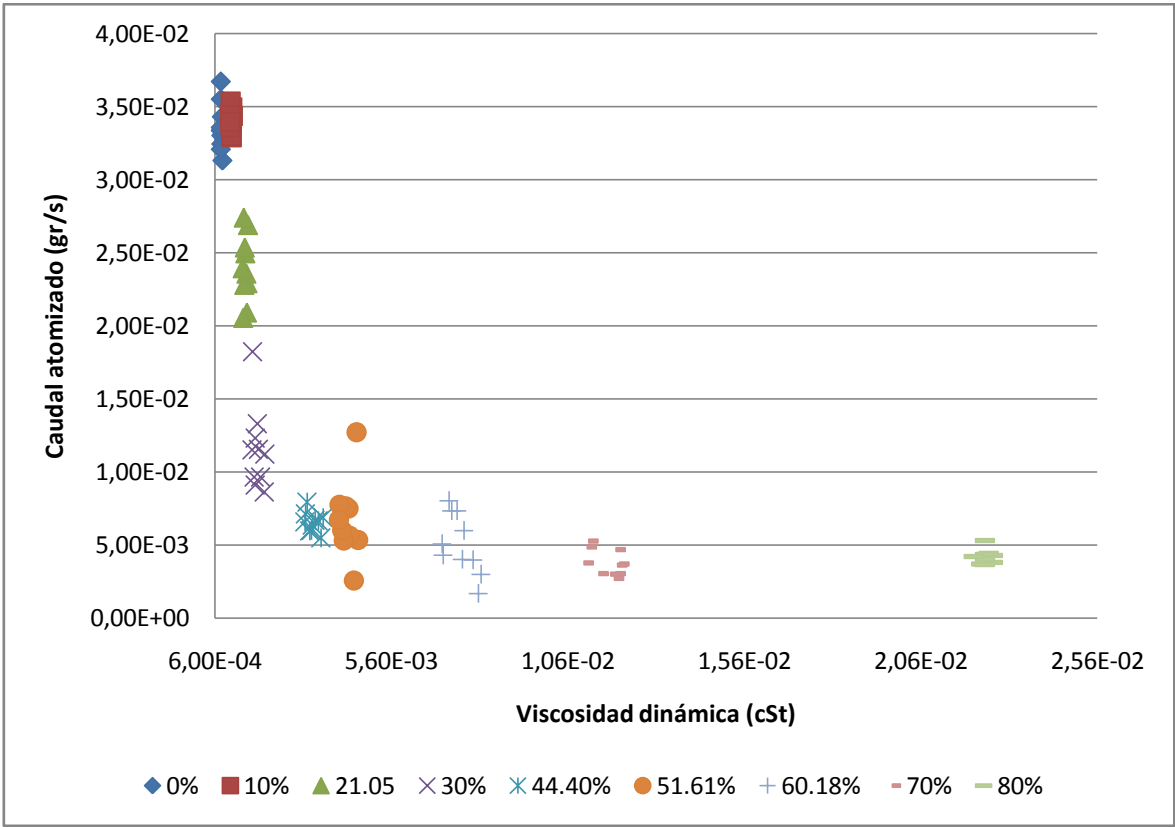
- A 50 voltios

0%			10%			21,05%		
mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q
7,94E-01	7,97E-04	3,13E-02	1,13E+00	1,10E-03	3,43E-02	1,60E+00	1,52E-03	2,69E-02
7,83E-01	7,87E-04	3,43E-02	1,12E+00	1,09E-03	3,49E-02	1,60E+00	1,52E-03	2,29E-02
7,77E-01	7,80E-04	3,30E-02	1,11E+00	1,08E-03	3,40E-02	1,57E+00	1,50E-03	2,09E-02
7,70E-01	7,74E-04	3,34E-02	1,10E+00	1,08E-03	3,29E-02	1,56E+00	1,49E-03	2,36E-02
7,65E-01	7,69E-04	3,24E-02	1,09E+00	1,07E-03	3,32E-02	1,53E+00	1,46E-03	2,50E-02
7,60E-01	7,64E-04	3,55E-02	1,08E+00	1,06E-03	3,30E-02	1,51E+00	1,44E-03	2,53E-02
7,58E-01	7,62E-04	3,21E-02	1,07E+00	1,05E-03	3,36E-02	1,49E+00	1,42E-03	2,28E-02
7,55E-01	7,59E-04	3,67E-02	1,06E+00	1,04E-03	3,53E-02	1,48E+00	1,41E-03	2,74E-02
7,54E-01	7,58E-04	3,33E-02	1,06E+00	1,03E-03	3,44E-02	1,46E+00	1,39E-03	2,06E-02
7,50E-01	7,55E-04	3,36E-02	1,05E+00	1,03E-03	3,40E-02	1,44E+00	1,37E-03	2,39E-02

30			44,4			51,61		
mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q
2,16E+00	2,01E-03	1,12E-02	4,05E+00	3,66E-03	6,88E-03	5,22E+00	4,65E-03	5,32E-03
2,15E+00	2,00E-03	8,61E-03	3,99E+00	3,60E-03	5,47E-03	5,18E+00	4,62E-03	1,27E-02
2,04E+00	1,90E-03	9,64E-03	3,90E+00	3,52E-03	6,66E-03	5,10E+00	4,54E-03	2,56E-03
1,97E+00	1,84E-03	1,15E-02	3,80E+00	3,43E-03	6,68E-03	4,96E+00	4,42E-03	5,62E-03
1,94E+00	1,81E-03	1,33E-02	3,72E+00	3,36E-03	6,35E-03	4,92E+00	4,39E-03	7,49E-03
1,87E+00	1,75E-03	9,10E-03	3,69E+00	3,33E-03	5,97E-03	4,84E+00	4,32E-03	7,65E-03
1,87E+00	1,74E-03	1,23E-02	3,63E+00	3,28E-03	5,94E-03	4,76E+00	4,25E-03	5,31E-03
1,83E+00	1,71E-03	9,64E-03	3,55E+00	3,21E-03	7,93E-03	4,71E+00	4,21E-03	5,98E-03
1,79E+00	1,67E-03	1,82E-02	3,50E+00	3,17E-03	7,14E-03	4,62E+00	4,12E-03	7,72E-03
1,76E+00	1,65E-03	1,15E-02	3,48E+00	3,15E-03	6,56E-03	4,61E+00	4,11E-03	6,70E-03

60,18%			70%			80%		
mu	nu	Q	mu	nu	Q	mu	nu	Q
9,28E+00	8,13E-03	3,01E-03	1,39E+01	1,20E-02	4,67E-03	2,66E+01	2,26E-02	4,29E-03
9,21E+00	8,06E-03	1,68E-03	1,40E+01	1,21E-02	3,69E-03	2,66E+01	2,26E-02	3,78E-03
9,02E+00	7,91E-03	3,97E-03	1,39E+01	1,20E-02	3,62E-03	2,65E+01	2,25E-02	4,44E-03
8,74E+00	7,66E-03	5,98E-03	1,39E+01	1,20E-02	3,02E-03	2,65E+01	2,25E-02	4,36E-03
8,67E+00	7,60E-03	4,01E-03	1,38E+01	1,19E-02	2,69E-03	2,64E+01	2,24E-02	5,29E-03
8,50E+00	7,45E-03	7,35E-03	1,37E+01	1,18E-02	3,00E-03	2,63E+01	2,23E-02	3,68E-03
8,34E+00	7,31E-03	7,33E-03	1,33E+01	1,15E-02	3,03E-03	2,64E+01	2,24E-02	4,34E-03
8,24E+00	7,23E-03	8,04E-03	1,30E+01	1,12E-02	5,26E-03	2,64E+01	2,24E-02	4,01E-03
8,05E+00	7,06E-03	4,32E-03	1,29E+01	1,11E-02	4,87E-03	2,64E+01	2,24E-02	3,66E-03
8,02E+00	7,04E-03	5,08E-03	1,28E+01	1,11E-02	3,76E-03	2,60E+01	2,21E-02	4,21E-03

Tabla 35: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 50 voltios



Gráfica 37: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 50 voltios

- 45 voltios

0%				10%				21,05%			
mu	nu	Q		mu	nu	Q		mu	nu	Q	
8,08E-01	8,11E-04	2,89E-02		1,07E+00	1,05E-03	2,70E-02		1,59E+00	1,51E-03	1,64E-02	
8,06E-01	8,10E-04	2,60E-02		1,07E+00	1,05E-03	2,62E-02		1,54E+00	1,46E-03	1,77E-02	
7,99E-01	8,03E-04	2,77E-02		1,06E+00	1,03E-03	2,75E-02		1,53E+00	1,46E-03	1,38E-02	
7,90E-01	7,94E-04	2,48E-02		1,05E+00	1,03E-03	2,82E-02		1,53E+00	1,45E-03	1,93E-02	
7,83E-01	7,87E-04	2,63E-02		1,05E+00	1,02E-03	2,68E-02		1,53E+00	1,45E-03	1,97E-02	
7,80E-01	7,84E-04	2,62E-02		1,04E+00	1,02E-03	2,76E-02		1,52E+00	1,45E-03	2,34E-02	
7,72E-01	7,75E-04	2,46E-02		1,03E+00	1,01E-03	2,77E-02		1,52E+00	1,45E-03	1,73E-02	
7,63E-01	7,67E-04	2,41E-02		1,03E+00	1,00E-03	2,20E-02		1,51E+00	1,44E-03	1,68E-02	
7,58E-01	7,62E-04	2,37E-02		1,02E+00	1,00E-03	3,71E-02		1,51E+00	1,43E-03	2,18E-02	
7,50E-01	7,55E-04	2,58E-02		1,02E+00	9,98E-04	2,78E-02		1,50E+00	1,43E-03	1,85E-02	

30%				44,4%				51,61%			
mu	nu	Q		mu	nu	Q		mu	nu	Q	
2,13E+00	1,98E-03	4,31E-03		4,00E+00	3,61E-03	7,17E-03		5,83E+00	5,19E-03	1,62E-03	
2,06E+00	1,92E-03	4,26E-03		3,86E+00	3,48E-03	5,13E-03		5,71E+00	5,08E-03	2,77E-03	
2,02E+00	1,88E-03	3,76E-03		3,76E+00	3,40E-03	4,85E-03		5,66E+00	5,04E-03	4,62E-03	
1,96E+00	1,83E-03	5,31E-03		3,64E+00	3,29E-03	6,05E-03		5,48E+00	4,88E-03	5,12E-03	
1,90E+00	1,77E-03	5,72E-03		3,50E+00	3,17E-03	5,30E-03		5,45E+00	4,85E-03	1,02E-02	
1,90E+00	1,77E-03	5,58E-03		3,49E+00	3,16E-03	5,95E-03		5,33E+00	4,75E-03	2,51E-03	
1,86E+00	1,74E-03	5,40E-03		3,42E+00	3,09E-03	6,16E-03		5,24E+00	4,67E-03	8,17E-03	
1,86E+00	1,73E-03	1,03E-02		3,41E+00	3,08E-03	5,67E-03		5,15E+00	4,59E-03	3,57E-03	
1,78E+00	1,66E-03	5,02E-03		3,24E+00	2,93E-03	6,55E-03		5,06E+00	4,51E-03	3,67E-03	
1,76E+00	1,65E-03	5,51E-03		3,21E+00	2,90E-03	5,87E-03		4,97E+00	4,44E-03	4,69E-03	

60,18%				70%				80%			
mu	nu	Q		mu	nu	Q		mu	nu	Q	
9,17E+00	8,03E-03	1,67E-03		1,37E+01	1,19E-02	3,03E-03		2,61E+01	2,22E-02	3,33E-03	
8,95E+00	7,84E-03	4,66E-03		1,37E+01	1,19E-02	3,26E-03		2,56E+01	2,18E-02	3,35E-03	
8,88E+00	7,78E-03	2,65E-03		1,37E+01	1,18E-02	2,41E-03		2,61E+01	2,22E-02	3,31E-03	
8,57E+00	7,51E-03	3,35E-03		1,33E+01	1,15E-02	3,93E-03		2,64E+01	2,24E-02	3,67E-03	
8,50E+00	7,45E-03	2,67E-03		1,32E+01	1,14E-02	2,72E-03		2,66E+01	2,26E-02	3,69E-03	
8,30E+00	7,28E-03	3,00E-03		1,31E+01	1,13E-02	2,57E-03		2,65E+01	2,25E-02	3,31E-03	
8,14E+00	7,14E-03	3,83E-03		1,29E+01	1,11E-02	2,17E-03		2,63E+01	2,23E-02	4,02E-03	
7,99E+00	7,01E-03	4,17E-03		1,28E+01	1,11E-02	2,16E-03		2,63E+01	2,23E-02	3,88E-03	
7,93E+00	6,96E-03	4,67E-03		1,27E+01	1,10E-02	3,02E-03		2,63E+01	2,23E-02	3,42E-03	
7,90E+00	6,93E-03	3,41E-03		1,27E+01	1,10E-02	2,81E-03		2,58E+01	2,19E-02	3,55E-03	

Tabla 36: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 45 voltios



- A 40 voltios

0%				10%				21,05%			
mu	nu	Q		mu	nu	Q		mu	nu	Q	
7,72E-01	7,75E-04	2,28E-02		1,13E+00	1,10E-03	1,78E-02		1,59E+00	1,51E-03	6,91E-03	
7,68E-01	7,72E-04	2,46E-02		1,12E+00	1,09E-03	1,71E-02		1,58E+00	1,50E-03	9,58E-03	
7,67E-01	7,71E-04	1,99E-02		1,10E+00	1,08E-03	1,89E-02		1,57E+00	1,50E-03	1,09E-02	
7,65E-01	7,69E-04	2,18E-02		1,10E+00	1,07E-03	1,78E-02		1,57E+00	1,50E-03	1,07E-02	
7,62E-01	7,66E-04	2,08E-02		1,08E+00	1,06E-03	1,85E-02		1,55E+00	1,47E-03	1,19E-02	
7,57E-01	7,61E-04	2,04E-02		1,08E+00	1,06E-03	1,85E-02		1,54E+00	1,47E-03	1,30E-02	
7,50E-01	7,55E-04	2,16E-02		1,07E+00	1,05E-03	1,82E-02		1,54E+00	1,46E-03	1,21E-02	
7,47E-01	7,51E-04	2,01E-02		1,07E+00	1,04E-03	1,90E-02		1,53E+00	1,45E-03	1,33E-02	
7,44E-01	7,48E-04	3,54E-02		1,06E+00	1,04E-03	2,05E-02		1,52E+00	1,45E-03	1,47E-02	
7,38E-01	7,42E-04	2,30E-02		1,05E+00	1,03E-03	1,85E-02		1,51E+00	1,44E-03	1,15E-02	

30%				44,4%				51,61%			
mu	nu	Q		mu	nu	Q		mu	nu	Q	
2,06E+00	1,92E-03	1,67E-03		3,86E+00	3,48E-03	3,65E-03		5,92E+00	5,26E-03	2,01E-03	
2,04E+00	1,90E-03	2,28E-03		3,80E+00	3,43E-03	3,40E-03		5,81E+00	5,17E-03	9,98E-04	
2,01E+00	1,88E-03	3,42E-03		3,75E+00	3,39E-03	3,32E-03		5,73E+00	5,10E-03	3,07E-03	
1,99E+00	1,86E-03	8,33E-03		3,70E+00	3,34E-03	4,00E-03		5,64E+00	5,02E-03	1,47E-03	
1,97E+00	1,84E-03	3,84E-03		3,66E+00	3,31E-03	5,04E-03		5,58E+00	4,97E-03	4,82E-03	
1,96E+00	1,83E-03	4,36E-03		3,63E+00	3,28E-03	4,68E-03		5,52E+00	4,92E-03	1,30E-03	
1,95E+00	1,82E-03	9,67E-03		3,62E+00	3,27E-03	7,00E-03		5,50E+00	4,90E-03	3,19E-03	
1,94E+00	1,81E-03	5,68E-03		3,58E+00	3,24E-03	2,55E-03		5,45E+00	4,85E-03	4,01E-03	
1,92E+00	1,79E-03	6,31E-03		3,54E+00	3,20E-03	5,21E-03		5,37E+00	4,78E-03	3,66E-03	
1,90E+00	1,77E-03	5,06E-03		3,54E+00	3,20E-03	4,32E-03		5,37E+00	4,78E-03	2,72E-03	

60,18%				70%				80%			
mu	nu	Q		mu	nu	Q		mu	nu	Q	
9,28E+00	8,13E-03	1,65E-03		1,36E+01	1,18E-02	6,06E-04		2,73E+01	2,32E-02	2,44E-03	
9,10E+00	7,97E-03	1,98E-03		1,32E+01	1,14E-02	7,49E-04		2,74E+01	2,33E-02	2,24E-03	
8,95E+00	7,84E-03	2,69E-03		1,30E+01	1,12E-02	6,62E-04		2,73E+01	2,32E-02	2,17E-03	
8,81E+00	7,72E-03	2,97E-03		1,28E+01	1,11E-02	6,58E-04		2,69E+01	2,29E-02	2,31E-03	
8,70E+00	7,63E-03	2,37E-03		1,25E+01	1,08E-02	2,00E-03		2,69E+01	2,29E-02	2,46E-03	
8,60E+00	7,54E-03	2,66E-03		1,23E+01	1,07E-02	2,03E-03		2,66E+01	2,26E-02	2,74E-03	
8,57E+00	7,51E-03	1,99E-03		1,21E+01	1,05E-02	3,00E-03		2,66E+01	2,26E-02	2,16E-03	
8,47E+00	7,42E-03	3,33E-03		1,19E+01	1,03E-02	2,32E-03		2,68E+01	2,27E-02	2,61E-03	
8,34E+00	7,31E-03	2,32E-03		1,18E+01	1,02E-02	1,67E-03		2,66E+01	2,26E-02	2,26E-03	
8,34E+00	7,31E-03	2,44E-03		1,17E+01	1,01E-02	1,52E-03		2,68E+01	2,27E-02	2,38E-03	

Tabla 37: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 40 voltios



## 8.5. Secuencias de alta velocidad

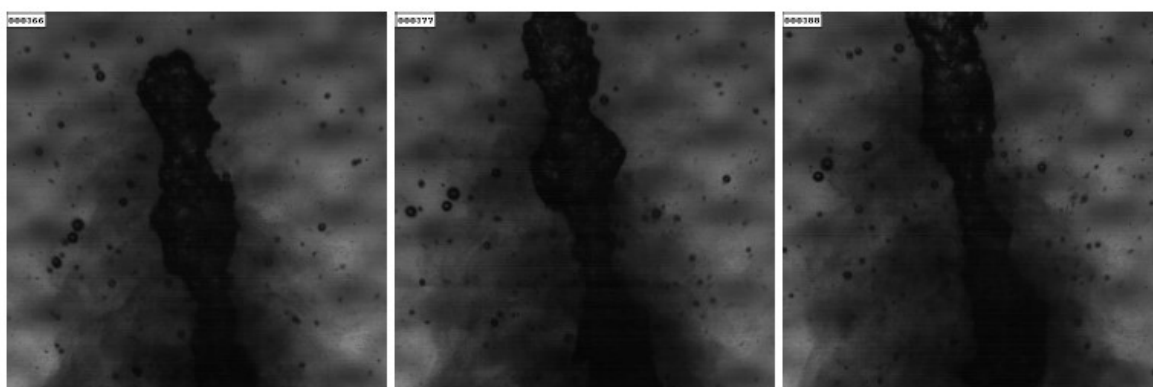
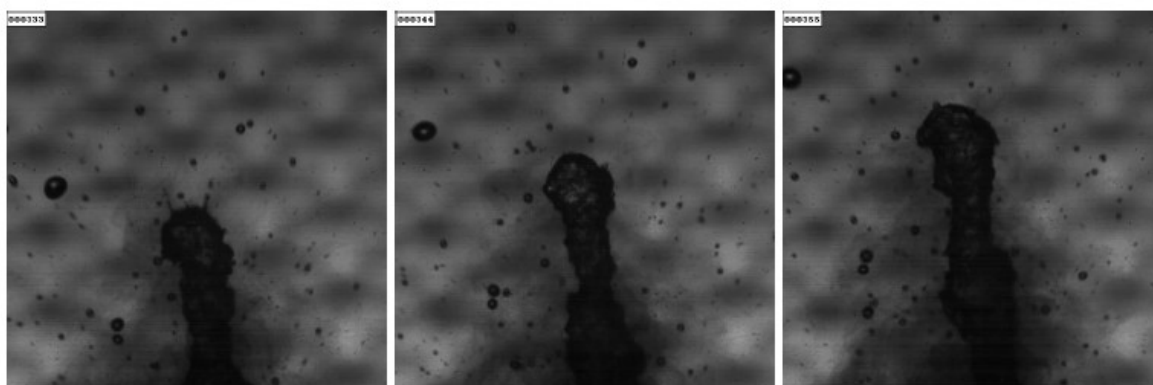
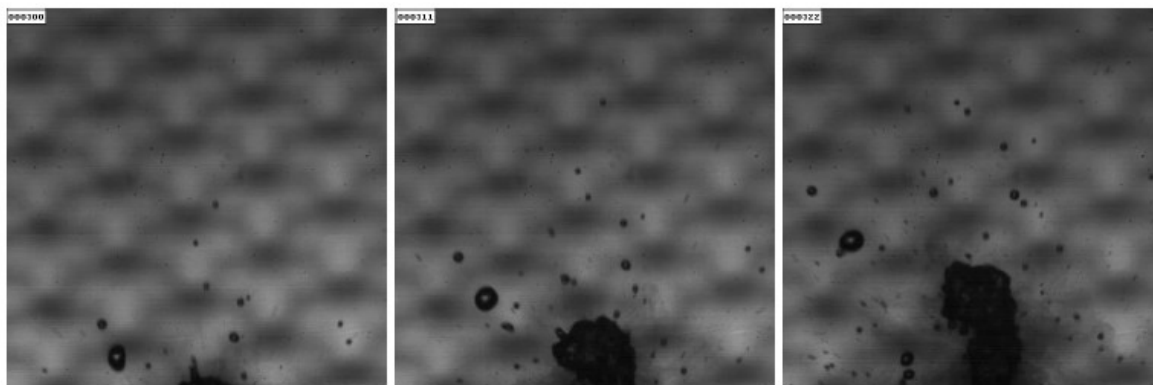
### 8.5.1. Formación del cono de atomización

En esta secuencia se muestra el ascenso del cono. Se ve con claridad que el agua se atomiza a lo largo del último tramo del cono, aunque la mayor parte se atomiza en la punta.

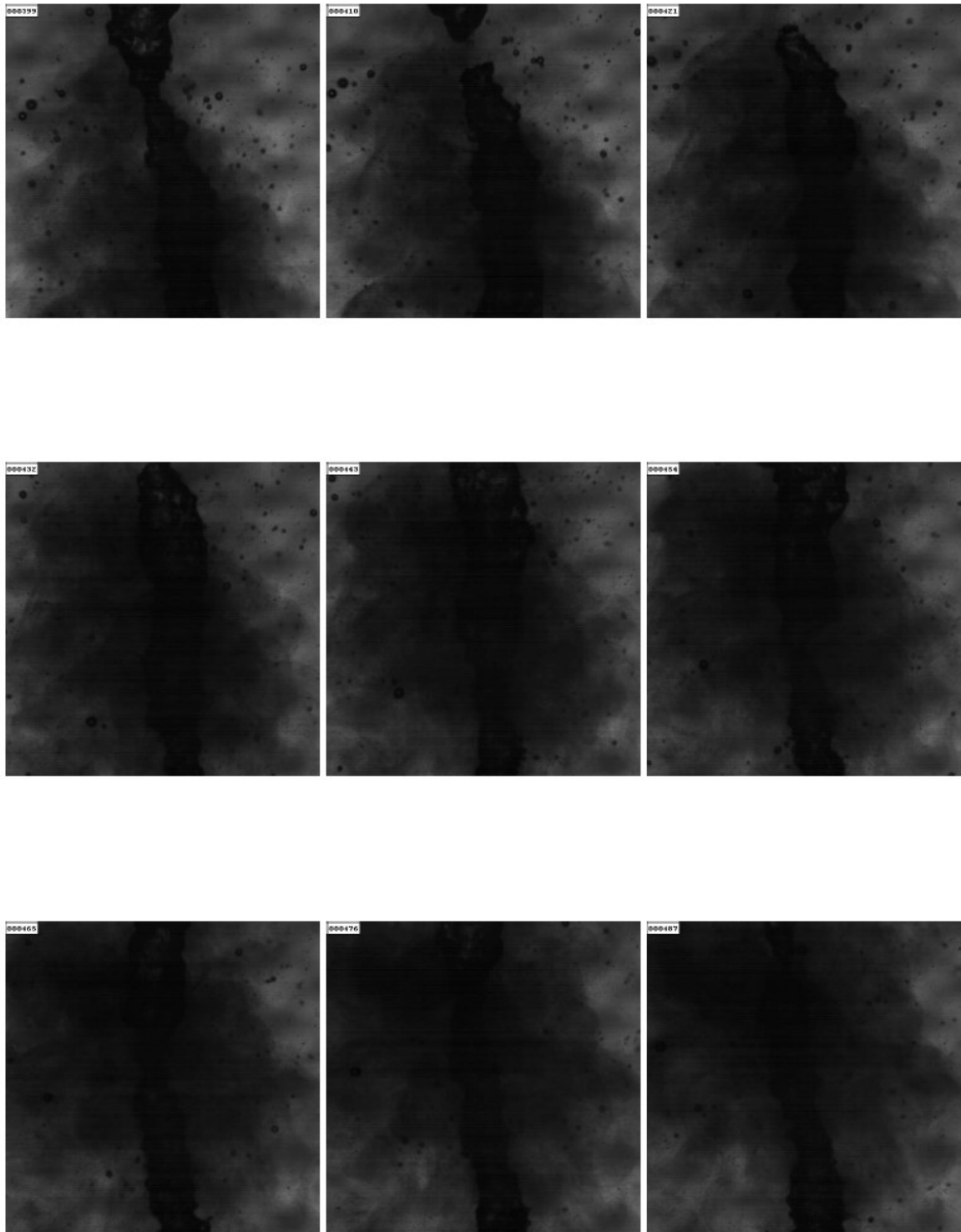
Aunque se aprecia con mayor claridad en la secuencia de vídeo, conforme se va elevando el cono se van produciendo “explosiones” que producen: salpicadura microscópica, salpicadura de tamaño medio y con forme se eleva el cono las explosiones provocan que parte de la punta del cono se desprenda.

El oscurecimiento de los fotogramas es debido al agua atomizada que aunque debido a su tamaño no sale enfocada en la imagen, se interpone entre el foco de luz y la cámara fotográfica.

La secuencia ha sido tomada a una tensión de 32,5 voltios. La velocidad de captura es de 2000 imágenes por segundo y los fotogramas son mostrados a intervalos regulares de 11.





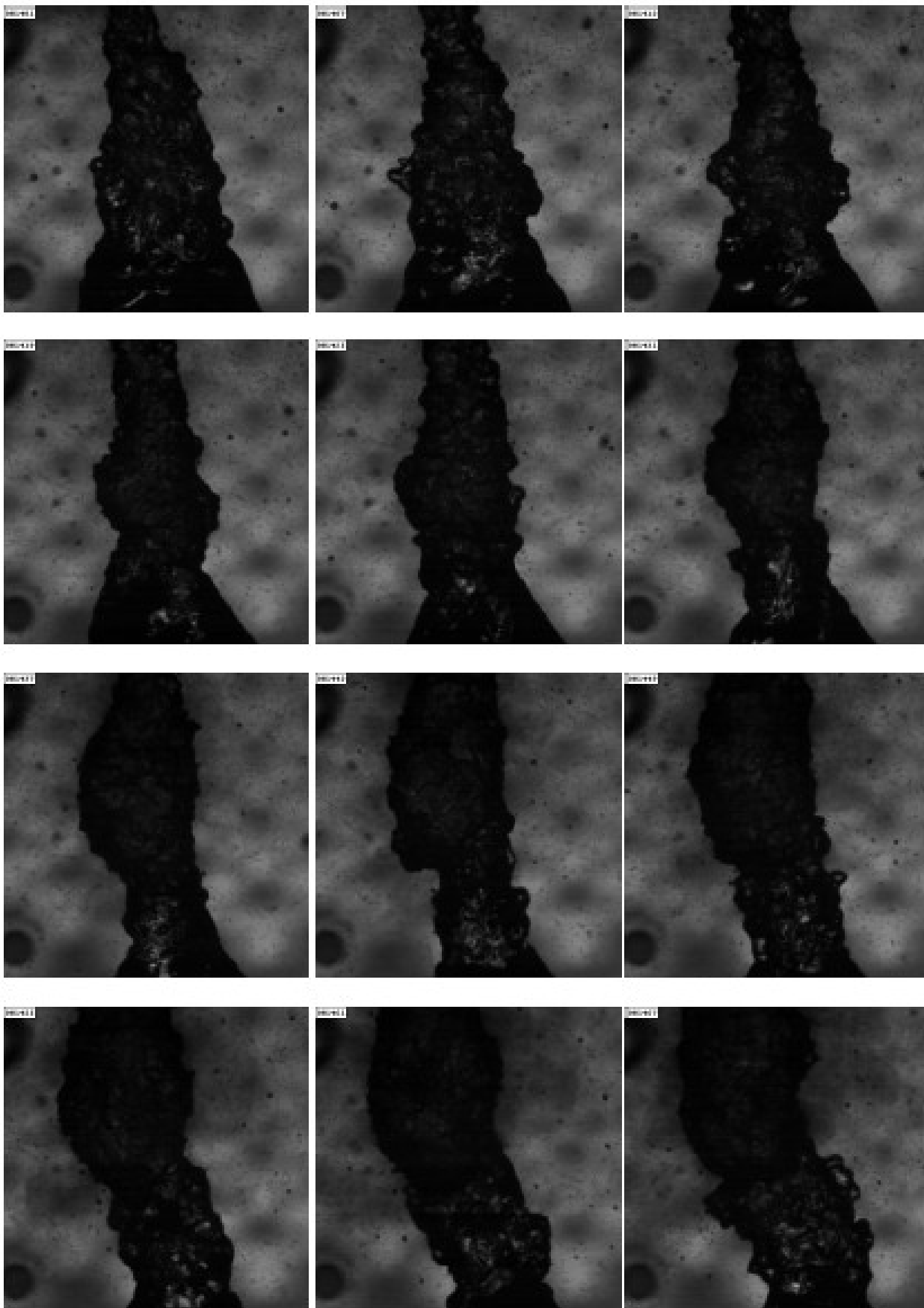


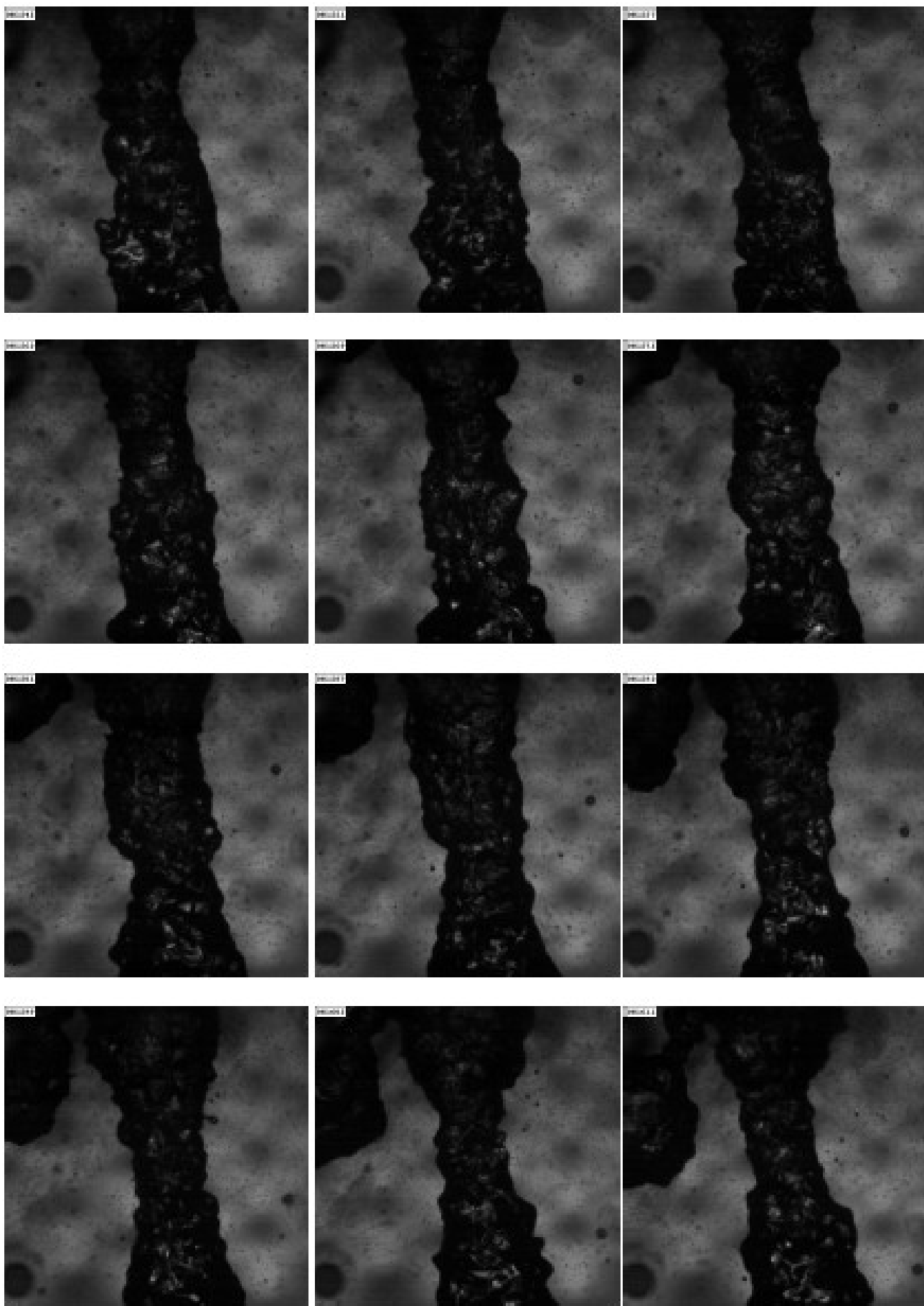
*Figura 20: Secuencia de alta velocidad de la producción del cono de atomización*

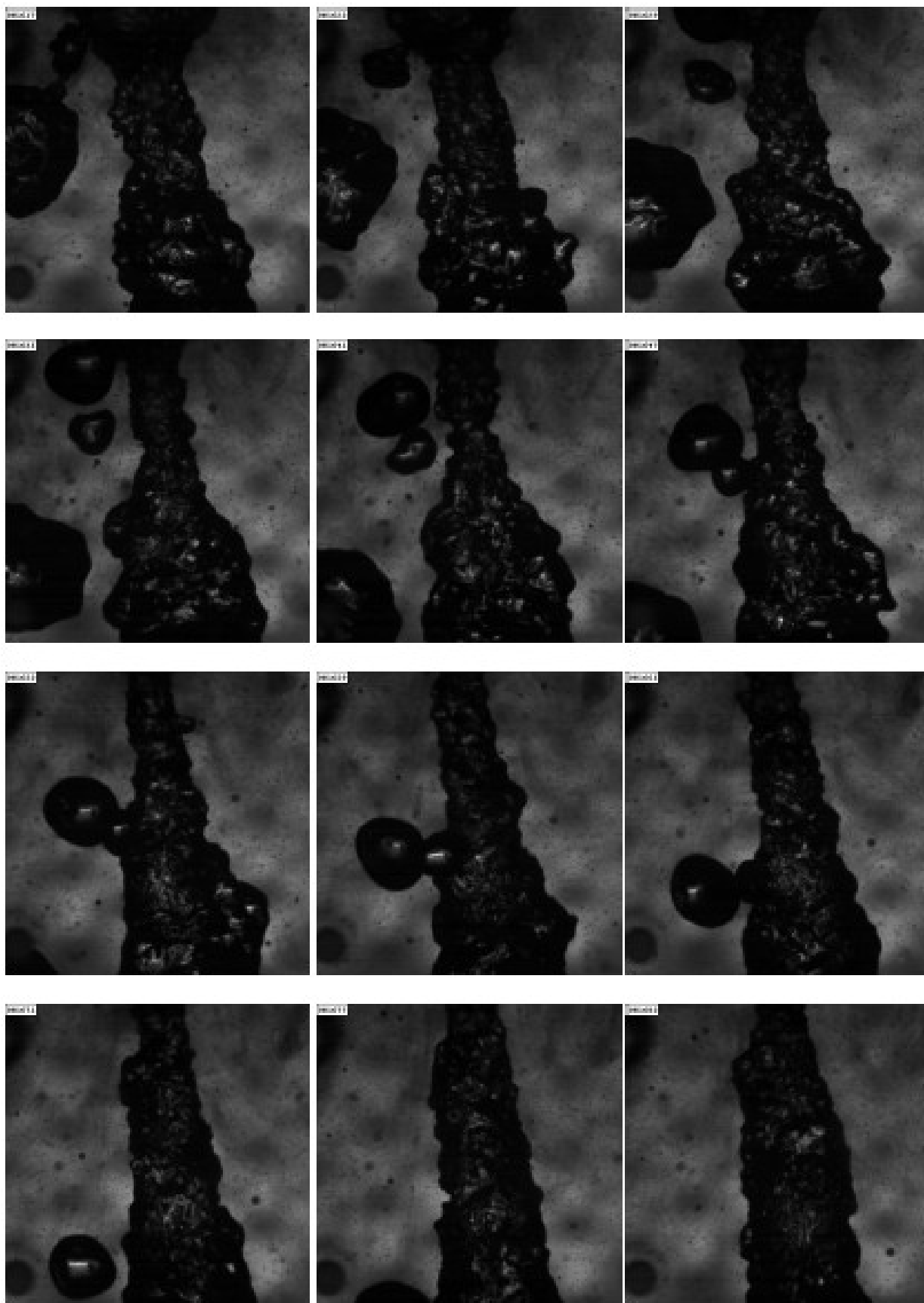
### 8.5.2. Secuencia del cono en estado estacionario

En la siguiente secuencia se muestra el cono de atomización en estado estacionario. Entre los detalles más importantes de la secuencia cabe destacar la inestabilidad del cono, en el que se producen desprendimientos de gotas de gran tamaño de la punta del cono. También cabe destacar que el tamaño de las gotas producidas no es uniforme, aunque teniendo en cuenta que la mayor parte de ellas es de pequeño tamaño.

La secuencia se ha tomado a una frecuencia de 2000 imágenes por segundo y los fotogramas extraídos se han tomado cada intervalo de 5 imágenes.







*Figura 21: Secuencia de alta velocidad de cono de atomización en estado estacionario*



---

## 9. ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: variables básicas para adimensionalizar el fenómeno .....	12
Tabla 2: Parámetros relevantes del circuito oscilador según fabricante. ....	16
Tabla 3: Valores del circuito equivalente asociado al disco piezoeléctrico .....	37
Tabla 4: Resultados primeros experimentos .....	72
Tabla 5: Tabla de datos altura/tiempo de los experimentos a distinta temperatura.....	74
Tabla 6: Caudales medios de los experimentos con agua a diferentes temperaturas .....	75
Tabla 7: Datos de pruebas midiendo el caudal con la balanza de precisión .....	76
Tabla 8: Caudales medios medidos con mezcla acuosa al 21,05% .....	79
Tabla 9: tabla de datos de curva a tensión variable con muestras cada 60 seg. para agua destilada .....	81
Tabla 10: tabla de datos de curva a tensión variable con muestras cada 60 seg. para mezcla acuosa de glicerina al 34,78% en volumen. ....	83
Tabla 11: tabla de datos de curva a tensión variable con muestras cada 60 seg. para mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en volumen. ....	85
Tabla 12: Datos resumen de caudales medios atomizados. Caudal en gr./seg. ....	87
Tabla 13: Caudales atomizados con agua destilada .....	89
Tabla 14: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 10% en volumen ...	90
Tabla 15: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 10% en vol.....	91
Tabla 16: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 21,05% en volumen .....	92
Tabla 17: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 10% en vol.....	93
Tabla 18: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 21,05% en volumen .....	94
Tabla 19: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 30% en vol.....	95
Tabla 20: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en vol. ....	96
Tabla 21: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en vol...	97
Tabla 22: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 51,61% en vol. ....	98

Tabla 23: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 51,61% en vol...	99
Tabla 24: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 60,18% .....	100
Tabla 25: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 60,18% en vol.	101
Tabla 26: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 70% en vol. ....	102
Tabla 27: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 70% en vol.....	103
Tabla 28: Datos de masa atomizada de mezcla acuosa de glicerina al 80% en vol. ....	104
Tabla 29: Caudales medios obtenidos con mezcla acuosa de glicerina al 80% en vol.....	105
Tabla 30: Datos de caudal vaporizado con tanque para 6 dispositivos .....	106
Tabla 31: Caudal medio obtenido con varios dispositivos simultáneamente.....	107
Tabla 32: Tabla comparativa del rendimiento obtenido en comparación con el funcionamiento de un disco .....	107
Tabla 33: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 60 voltios .....	109
Tabla 34: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 55 voltios .....	111
Tabla 35: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 50 voltios .....	113
Tabla 36: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 45 voltios .....	115
Tabla 37: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 40 voltios .....	117



---

## 10. ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 1: Primeros experimentos.....	52
Gráfica 2: Caudales del primer experimento .....	52
Gráfica 3: Experimentos con agua a distinta temperatura .....	53
Gráfica 4: Masa atomizada experimento de prueba.....	54
Gráfica 5: Medida de caudales de prueba.....	55
Gráfica 6: Masa atomizada de mezcla acuosa al 21,05% en volumen .....	56
Gráfica 7: Caudal atomizado.....	56
Gráfica 8: Caudal de fluido atomizado con tensión variable y diferentes concentraciones de glicerina .....	57
Gráfica 9: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 60 voltios.....	63
Gráfica 10: Tendencia de disminución del caudal atomizado con forme aumenta la viscosidad.....	63
Gráfica 11: Caudal – Tiempo. Primeros experimentos.....	73
Gráfica 12: Curva altura de fluido- tiempo con el agua a distintas temperaturas.....	75
Gráfica 13: agua atomizada en la primera prueba con la balanza de precisión .....	77
Gráfica 14: Caudal atomizado en las distintas muestras de prueba con la balanza de precisión .....	77
Gráfica 15: Tabla de datos de experimentos de prueba con mezclas acuosas de glicerina	78
Gráfica 16: Curvas de fluido atomizado en la prueba con mezcla acuosa de glicerina .....	79
Gráfica 17: Caudal atomizado en las distintas muestras con las mezclas acuosas de glicerina .....	79
Gráfica 18: Resumen del caudal másico atomizado con diferentes concentraciones de glicerina en un minuto y con tensión variable .....	80
Gráfica 19: masa de agua atomizada con tensión variable y muestreos cada 60 segundos .....	82
Gráfica 20: Caudal másico en función de la potencia consumida con agua destilada.....	82

Gráfica 21: masa de mezcla de glicerina al 34,78% en vol. atomizada con tensión variable y muestreos cada 60 segundos .....	84
Gráfica 22: Caudal másico en función de la potencia consumida con mezcla acuosa de glicerina al 34,78% en volumen.....	84
Gráfica 23: masa de mezcla de glicerina al 44,44% en vol. atomizada con tensión variable y muestreos cada 60 segundos .....	86
Gráfica 24: Caudal másico en función de la potencia consumida con mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en volumen.....	86
Gráfica 25: Curvas resumen del caudal másico vaporizado (valores medios) para cada concentración de glicerina a tensión de alimentación variable.....	88
Gráfica 26: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 10% en vol. ....	91
Gráfica 27: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 21,05% en vol. ....	93
Gráfica 28: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 30% en vol. ....	95
Gráfica 29: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 44,44% en vol. ....	97
Gráfica 30: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 51,61% en vol. ....	99
Gráfica 31: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 60,18% en vol. ....	101
Gráfica 32: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 70% en vol. ....	103
Gráfica 33: Masa atomizada a distintas tensiones con mezcla acuosa de glicerina al 80% .....	105
Gráfica 34: Comparación de caudales atomizados por los dispositivos .....	107
Gráfica 35: caudal atomizado en función de la viscosidad a 60 voltios .....	110
Gráfica 36: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 55 voltios.....	112
Gráfica 37: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 50 voltios.....	114
Gráfica 38: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 45 voltios.....	116

Gráfica 39: Caudal atomizado en función de la viscosidad a 40 voltios.....	118
--	-----

---

## 11. ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Cerámicas piezoeléctricas.....	17
Figura 2: Tanque de vaporización.....	20
Figura 3: Amplificador realimentad .....	30
Figura 5: Esquema básico de un oscilador L-C.....	31
Figura 4: Circuito equivalente para señal .....	31
Figura 6: Detalle del circuito oscilador .....	34
Figura 7: Detalle de la regla para la medida del nivel de fluido .....	40
Figura 8: montaje de medida con balanza de precisión y monitorización de temperatura	42
Figura 9: Tanque para 6 atomizadores funcionando .....	47
Figura 10: Montaje del objetivo fotográfico en la cámara de alta velocidad. ....	48
Figura 11: Esquema de disposición para fotografiado .....	49